

М. А. Киреев

Практический расчет каскадов усилителей звуковой частоты на электронных лампах

**Москва
Горячая линия - Телеком
2015**

УДК 621.375.2
ББК 32.846.6
К43

Киреев М. А.

К43 Практический расчет каскадов усилителей звуковой частоты на электронных лампах. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 124 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0227-5.

В книге рассмотрены основные типы каскадов ламповых усилителей звуковой частоты (УЗЧ). Подробно обсуждаются практические методики расчета каждого каскада. Рассмотренный теоретический материал подкреплён практическими примерами схемного и конструктивного исполнения. Книга содержит расчетные программы, существенно облегчающие процесс расчета режимов схем и параметров радиоэлементов. Простые и доступные расчеты позволяют читателю легко создать свою собственную конструкцию УЗЧ. Тексты программ доступны читателю на сайте издательства.

Для специалистов и подготовленных радиолюбителей, занимающихся разработкой высококачественных УЗЧ.

ББК 32.846.6

Адрес издательства в Интернет www.techbook.ru

Справочное издание

Киреев Михаил Анатольевич

Практический расчет каскадов усилителей звуковой частоты на электронных лампах

Редактор А. Е. Пескин
Обложка художника В. Г. Ситникова
Компьютерная верстка Ю. И. Чернышова

Подписано в печать 12.11.2011. Формат 60×90. 16.
Уч.-изд. л. 7,75. Изд. № 110227. Тираж 500 экз. (3-й завод 50 экз.)
ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»

ISBN 978-5-9912-0227-5

© М. А. Киреев, 2012, 2015
© Издательство «Горячая линия – Телеком», 2012

ВВЕДЕНИЕ

Начальный период развития радиотехники шел по пути создания простейших искровых радиостанций. Увеличение дальности радиосвязи достигалось за счет увеличения мощности радиопередатчиков, увеличения длин волн, а также размеров как передающих, так и приемных антенн. Коренные изменения в радиотехнике начали происходить с момента появления первых электронных ламп.

Понятие «электронная лампа» в широком смысле относится к любому электровакуумному прибору, электрический ток в котором создается потоком электронов, испускаемых нагретым электродом — катодом и приходящих на холодный электрод — анод. За начало отсчета развития истории ламповой радиотехники принято считать 1904 г., когда английский специалист в области радиотехники Дж. А. Флеминг предложил первый детектор на электронной лампе, принцип работы которой был основан на эффекте Эдисона — одностороннем прохождении электрического тока от нагретой до высокой температуры нити (катода) к металлической пластине (аноду). В 1907 г. американский инженер Ли де Форест получил патент на изобретенную им трехэлектродную лампу — триод, названную им «аудион». Триод Ли де Фореста состоял из угольной нити накаливания, платинового анода и зигзагообразной сетки, которую он расположил в непосредственной близости от катода. «Аудион» Ли де Фореста использовался в основном в качестве детектора и имел ограниченный коэффициент усиления, что объяснялось невысоким качеством откачки воздуха из баллона.

С 1916–1917 гг. в технике создания вакуума в баллонах электронных ламп стал использоваться диффузионный насос Лангмюра, что привело к началу использования ламп с полностью электронными процессами. В России первые электронные лампы были созданы выдающимся российским физиком Н. Д. Папалекси в 1914 г. Август 1918 г. был отмечен созданием Нижегородской радиолaborатории, где под руководством военного инженера М. А. Бонч-Вруевича было разработано не одно поколение отечественных генераторных ламп. В 20-е годы прошлого столетия появились двухсеточные лампы, а с 30-х годов в создании электронных ламп начался лавинообразный процесс создания трех-, четырех-, пятисеточных ламп в различном конструктивном исполнении баллона — металлокерамические, стеклянные, ме-

таллические. Это послужило созданию классификации электронных ламп по назначению и функциональному составу.

До 70-х годов прошлого столетия электронные лампы оставались основными активными элементами при построении приемников и передатчиков различного назначения, систем связи, радиолокации и радионавигации. В последнее время, несмотря на впечатляющие достижения твердотельных технологий, наметился возврат к ламповой схемотехнике в области звуковоспроизведения высокой верности.

Книга предназначена для радиолюбителей, занимающихся самостоятельным расчетом и изготовлением ламповых усилителей звуковой частоты.

1 КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ РАДИОЛАМП

Электронная лампа представляет собой прибор, состоящий из системы электродов, помещенный в баллон (стеклянный, металлический или металлокерамический) в котором создан вакуум (рис. 1.1).

Уровень разряжения в радиолампах создается на уровне $5 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-7}$ Па. Для поддержания такого вакуума в баллон электронной лампы после откачки воздуха вводят дополнительно газопоглотители. В качестве газопоглотителей обычно используются соединения на основе магния и бария. Рассмотрим более подробно узлы, из которых состоит электронная лампа.

Катод электронной лампы служит источником свободных электронов. Работа катода основана на испускании электронов с поверхности металла. Чем выше температура катода, тем большее число электронов приобретает энергию, необходимую для выхода, вследствие чего возрастает ток термоэлектронной эмиссии.

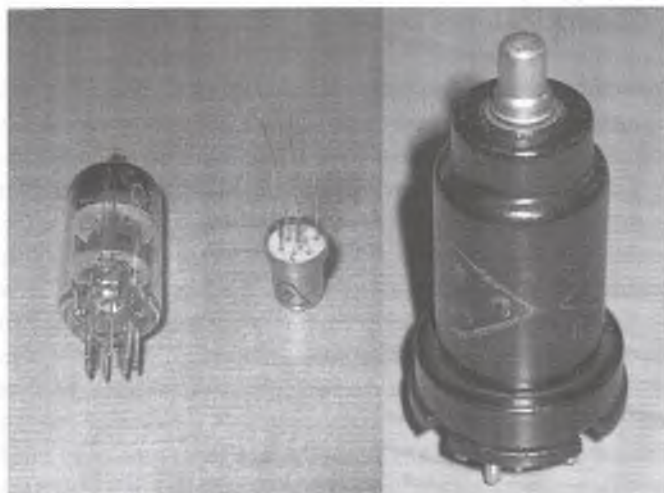


Рис. 1.1. Внешний вид современных электронных ламп

Значение плотности тока термоэлектронной эмиссии определяется известным уравнением Ричардсона — Дэшмена:

$$j_E = A_0 T^2 S \exp\left(\frac{-e\varphi_0}{KT}\right), \quad (1.1)$$

где A_0 — универсальная термоэмиссионная постоянная, равная $120,4 \text{ A}/(\text{см}^2 \text{K}^2)$; T — рабочая температура катода, К; e — заряд электрона, равный $-1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$; k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$; φ_0 — потенциал выхода электрона из материала катода, для чистых металлов находится в пределах $1,87...5,32 \text{ эВ}$.

Из уравнения (1.1) следует, что повышение температуры катода приводит к росту тока эмиссии. Однако чрезмерное повышение температуры катода приводит к негативным последствиям — резкому сокращению срока службы катода и деформации близко расположенных электродов. Катод электронной лампы должен обеспечивать большой ток эмиссии при небольшой затрачиваемой мощности на нагрев. Катод должен обладать долговечностью и устойчивостью к вибрационным нагрузкам и ионной бомбардировке. Свойства катодов оцениваются следующими параметрами.

- *Рабочая температура* — номинальное значение температуры, при которой выполняются основные перечисленные выше требования. Температурный диапазон различных типов катодов лежит в интервале $T = 700...2600 \text{ }^\circ\text{C}$.
- *Удельная эмиссия* — величина тока эмиссии, приведенная к площади катода в 1 см^2 :

$$I_{э,уд} = I_э / S_k, \quad (1.2)$$

где $I_э$ — ток эмиссии катода, мА; S_k — полная поверхность катода, см^2 . Удельная эмиссия зависит от рабочей температуры катода и относится обычно к катодам, выполненным из чистых металлов.

- *Допустимая плотность катодного тока* — этот параметр характеризует сложные катоды с активирующими слоями на поверхности. Из-за частичного разрушения этого слоя при работе эмиссионная способность катода изменяется, поэтому вместо удельной эмиссии вводится определение допустимой плотности катодного тока, которая показывает, какую величину тока, приходящуюся на 1 см^2 площади может обеспечить катод при разогреве до рабочей температуры.
- *Удельная мощность накала* — мощность, которую необходимо затратить на нагрев 1 см^2 площади катода до рабочей температуры. Мощность, расходуемая на нагрев катода, в большей степени

идет на нагрев окружающих катод элементов электронной лампы. Уменьшение удельной мощности накала достигается уменьшением нагрева элементов электронной лампы окружающих катод и уменьшением рабочей температуры катода.

Так как на нагрев катода до рабочей температуры необходимо затратить некоторую электрическую мощность, желательно, чтобы при малой затрачиваемой мощности катод излучал большее число электронов, т.е. катод должен быть экономичным. Экономичность катода оценивается его эффективностью.

- *Эффективность катода* — величина, численно равная отношению тока эмиссии к мощности, затрачиваемой на нагрев катода до рабочей температуры:

$$H = I_{\text{э}} / P_{\text{н}}, \quad (1.3)$$

где $I_{\text{э}}$ — ток эмиссии катода, мА; $P_{\text{н}}$ — мощность, затрачиваемая на нагрев катода, Вт.

- *Долговечность катода* — время, в течение которого не происходит разрушения катода, а ток эмиссии может уменьшиться на некоторую фиксированную для данного типа катода величину. На долговечность катода сильно влияет рабочая температура, при превышении которой происходит повышенное испарение материалов, из которых выполнен катод.

Катоды электронных ламп по материалу исполнения делятся на две группы. Катоды *первой группы* изготавливают из тугоплавких металлов — вольфрама, тантала. Рабочие температуры вольфрамовых катодов равны 2130...2430 °С, работа выхода составляет 4,52 эВ. Долговечность составляет 1000...3000 ч. Достоинствами вольфрамовых катодов являются стабильная эмиссия электронов и стойкость к ионной бомбардировке. У танталовых катодов рабочие температуры лежат в диапазоне 2050...2200 °С при работе выхода 4,07 эВ.

Вторая группа катодов — *пленочные катоды*. При их изготовлении на поверхности материала, из которого изготовлен катод, формируется слой, уменьшающий работу выхода, сюда входят торированные, карбидированные и бариево-вольфрамовые катоды. Торированные катоды изготавливают из вольфрамовой проволоки, содержащей примесь окиси тория. При нагреве проволоки до температуры 2100 °С на ее поверхности образуется слой чистого тория, уменьшающего работу выхода. Рабочая температура торированного катода равна 1800 °С, работа выхода 2,6 эВ. Недостатками такого катода являются нестабильность электронной эмиссии и чувствительность к ионной бомбардировке.

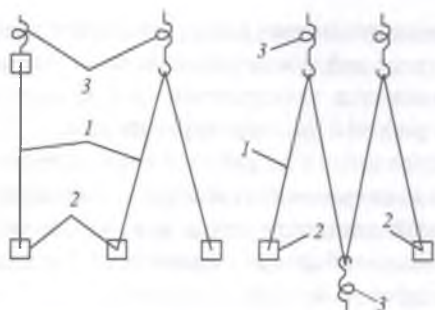


Рис. 1.2. Конструктивное исполнение катодов прямого накала

Карбидированные катоды изготавливают методом прокаливания торированной вольфрамовой проволоки в атмосфере углеводородов. В результате этого на поверхности вольфрамовой нити образуется слой карбида вольфрама, а на нем в свою очередь оседает пленка тория. Рабочая температура карбидированного катода равна 1900°C , работа выхода $1,8\text{ эВ}$. Карбидированные катоды более устойчивы к ионной бомбардировке и имеют большую долговечность. Недостатками карбидированных катодов являются нестабильность эмиссии и малая механическая прочность, вследствие хрупкости карбида вольфрама.

По конструктивному исполнению катоды делятся на катоды прямого накала и катоды косвенного накала. Катод прямого накала (рис. 1.2) представляет собой металлическую нить или ленту 1, которая приваривается к держателям 2 и поддерживается растяжками 3.

В зависимости от конструкции лампы катод может иметь различную форму. В случае цилиндрического анода (например, 3Ц18П) катод представляет собой прямую нить, покрытую активирующим слоем, натянутую с помощью держателей.

Катоды прямого накала предпочтительно питать напряжением постоянного тока. При питании катода прямого накала напряжением переменного тока вследствие его малой массы рабочая температура будет изменяться пропорционально удвоенной частоте питающего напряжения, что приведет к пульсации электронного потока. Катоды прямого накала питаются напряжением переменного тока в двух случаях:

- электронная лампа используется для выпрямления переменного тока (кенотрон);
- катод прямого накала выполнен из толстой проволоки, что обеспечивает ему большую температурную инерционность, или на

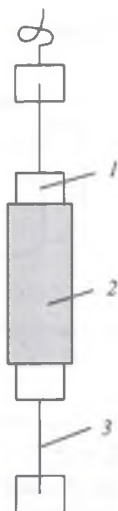


Рис. 1.3. Конструкция катода прямого накала с увеличенной тепловой инерцией

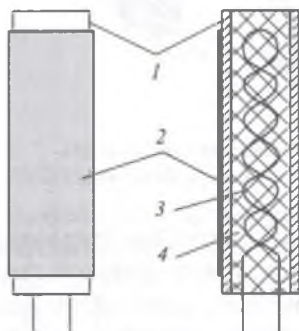


Рис. 1.4. Конструкция катода косвенного накала

нить накала дополнительно надета металлическая трубка 1, покрытая активирующим составом 2 (рис. 1.3).

Катод косвенного накала рассчитан для питания напряжением переменного тока. Строение катода косвенного накала изображено на рис. 1.4. Он состоит из металлического цилиндра из никеля 1 покрытого оксидным слоем 2 и расположенным внутри цилиндра подогревателем 3, выполненным из вольфрамовой проволоки. Пространство внутри катода заполнено окисью алюминия — алундом 4. Благодаря алунду увеличивается масса катода, что увеличивает его температурную инерцию и как следствие этого стабильность электронного потока, а также исключается возможность короткого замыкания между катодом и подогревателем. Вследствие того, что ток накала в катоде косвенного накала проходит по внутреннему подогревателю, а не по никелевой трубке, на ней не создаются падения напряжения. Иными словами, потенциал катода косвенного накала одинаковый во всех его точках, т.е. в отличие от катода прямого накала катод косвенного накала является *эквипотенциальным*.

Сетки располагают в пространстве между катодом и анодом и служат для управления плотностью электронного потока в лампе. В подавляющем большинстве используемых типов современных электронных ламп используются спиральные сетки, имеющие круглый, эллиптический или прямоугольный профиль (рис. 1.5).

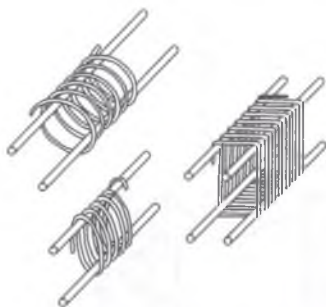


Рис. 1.5. Конструктивное исполнение сеток электронных ламп

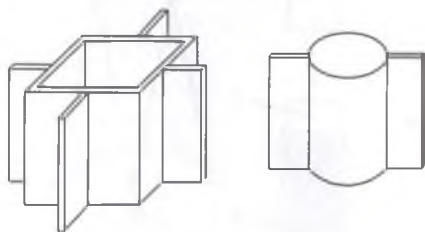


Рис. 1.6. Форма анодов электронных ламп

Металлы, которые предназначены для изготовления сеток, должны обладать механической прочностью, высокими электро- и теплопроводностью, хорошей свариваемостью. Этими свойствами обладают вольфрам, молибден, сплавы вольфрама с молибденом и никеля с молибденом (НИМО-25). Траверсы, на которые происходит навивка сеток, изготавливают из никеля, меди сплавов меди с марганцем и хромом. В ряде случаев для улучшения рабочих характеристик на сетки напыляют дополнительные покрытия. Чернение сеток нанесением на них тонкого слоя титана или ситаллоцемента позволяет повысить коэффициент вторичной эмиссии и предотвратить перегрев и деформацию сеток. Золочение устраняет паразитную термоэлектронную эмиссию.

Анод служит для собирания электронов, эмиттированных катодом. Аноды электронных ламп имеют разнообразную форму — цилиндрическую, круглую, прямоугольную (рис. 1.6).

Так как на аноде выделяется значительное количество энергии, применяют меры для его эффективного охлаждения. Аноды с естественным охлаждением выполняют с возможно большей поверхностью, при этом ее матируют или придают ей дополнительную шероховатость. Также для увеличения теплоизлучения поверхность анода покрывают чернящими покрытиями на основе карбидов металлов, порошков титана или циркония, мелкоизмельченного графита. Материалы, идущие на изготовление анодов, должны сочетать в себе высокую прочность с пластичностью для сохранения своих геометрических форм при длительном термическом воздействии, не содержать в своем составе компонентов, которые могут выделяться и отравлять катод, а также быть устойчивы к ионной бомбардировке. Аноды ламп с естественным охлаждением изготавливают из никеля, титана, молибдена и танталониобиевых сплавов.

2 ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЙ ДИОД

2.1. Устройство и принцип работы диода

По своему конструктивному исполнению *электроввакуумный диод* представляет собой два цилиндрических электрода — катод (К) и анод (А), разделенные вакуумным промежутком. Конструкция электроввакуумного диода изображена на рис. 2.1.

Рабочий режим диода обеспечивается подключением источника анодного тока E_a для создания ускоряющего электрического поля в междуэлектродном промежутке. Положительный полюс E_a подключают в анодную цепь, а отрицательный полюс — к катоду (рис. 2.2). При этом разность потенциалов между анодом и катодом U_a называется анодным напряжением. При включении источника накального напряжения E_n катод разогревается и начинает эмиттировать электроны, которые, попадая в ускоряющее электрическое поле между катодом и анодом, вызывают появление электрического тока внутри лампы и во внешней цепи. Если полярность источника анодного тока поменять на противоположную, т.е. положительный полюс E_a подключить к катоду, а отрицательный — в анодную цепь, то эмиттированные катодом электроны попадут в тормозящее электрическое поле и вернутся обратно на катод. Ток через диод не потечет. На этом свойстве односторонней проводимости электроввакуумного диода основано его применение в качестве выпрямителя переменного тока.

На прохождение тока через диод влияет распределение потенциала в промежутке между катодом и анодом. Для наглядности изобра-



Рис. 2.1. Внешний вид высоковольтного кенотрона 1Ц21П

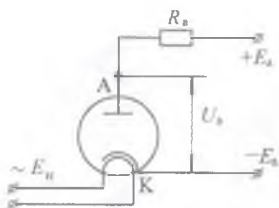


Рис. 2.2. Подключение питающих напряжений к электровакуумному диоду

каким катод и анод в виде бесконечных параллельных плоскостей, расстояние между которыми равно r_{a-k} (рис. 2.3).
Примем потенциал катода равным 0, а потенциал анода относительно катода равным U_a , при этом температура катода равна t_0 . Если катод не прогрет и не эмитирует электроны, то потенциал между катодом и анодом изменяется по линейному закону (линия 1). Если теперь катод разогреть до некоторой температуры $t_1 > t_0$, то эмитированные электроны заполняют междуэлектродное пространство и создадут объемный заряд. При этой температуре плотность объемного заряда мала, поэтому потенциал всех точек поля в междуэлектродном пространстве снижается, но остается неизменным (линия 2). Электрическое поле на всем участке является ускоряющим, анодный ток при этом равен току эмиссии, диод находится в режиме насыщения.

При дальнейшем увеличении температуры катода $t_2 > t_1$ растет эмиссия электронов и плотность объемного заряда, а потенциал электрического поля между электродами снижается, особенно вблизи поверхности катода, где объемная плотность заряда максимальна (линия 3). На некотором расстоянии от катода (расстояние $r_{a-k \min}$) возникает

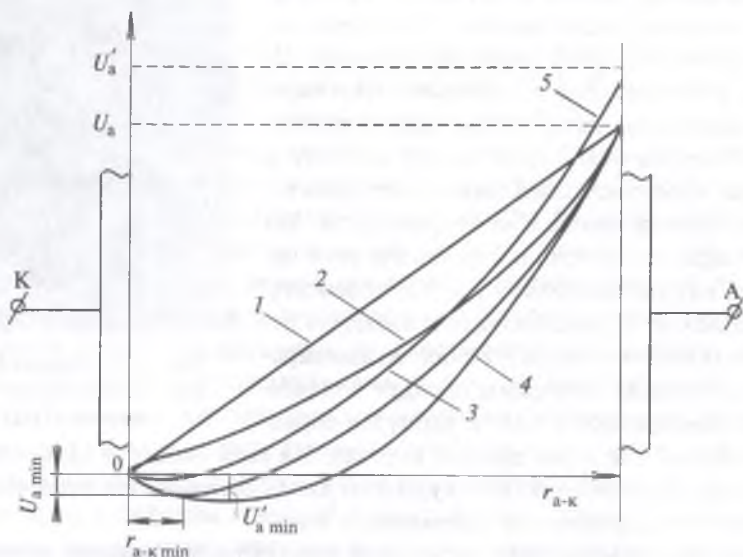


Рис. 2.3. Распределение потенциалов в электровакуумном диоде

отрицательное значение потенциала анода ($-U_a$), т.е. электрическое поле объемного заряда становится тормозящим. В этом случае только электроны с большой начальной скоростью могут достичь анода. Этот режим, при котором анодный ток меньше тока эмиссии, называется режимом пространственного заряда. Если теперь еще увеличить температуру катода до температуры $t_3 > t_2$ при условии $U_a = \text{const}$, то возрастет плотность объемного заряда, высота потенциального барьера станет равной $-U'_{a \min}$ и сдвинется в сторону анода (линия 4). В этом случае еще больше электронов будет оставаться в объемном заряде и возвращаться к катоду. Анодный ток в этом случае будет оставаться неизменным. Если теперь при $t_3 = \text{const}$ увеличить напряжение анода до величины U'_a , то величина суммарного поля в междueleктродном пространстве возрастет, величина потенциального барьера уменьшится, а минимум потенциального поля сдвинется в сторону катода (линия 5). В этом случае число электронов преодолевших тормозящее поле возрастет, а следовательно, увеличится ток анода при неизменном токе эмиссии. При достаточно большом анодном напряжении потенциальный барьер катода исчезнет и ток анода станет равным току эмиссии. В этом случае диод будет работать в режиме насыщения, при котором дальнейшее увеличение анодного напряжения не приведет к росту анодного тока.

Созданный объемным зарядом потенциальный минимум и прилегающая к нему область объемного заряда снижают собственные шумы лампы, а также защищают катод от ионной бомбардировки и экранируют его от электрического поля анода.

2.2. Характеристики диода

Параметры диода определяются по его анодным характеристикам. Анодные характеристики являются зависимостью анодного тока I_a от напряжения U_a на аноде при неизменном напряжении накала ($U_n = \text{const}$).

На каждой анодной характеристике (рис. 2.4) можно увидеть три определенные области: начальная (точки 1 — 2), восходящая (точки 2 — 3), пологая (точки 3 — 4). На начальном участке анодный ток определяется электронами, энергия которых достаточна для преодоления тормозящего электрического поля:

$$I_a = \frac{m_e v_0^2}{2} > eU_a, \quad (2.1)$$

где m_e — масса электрона; v_0 — скорость электрона; e — заряд электрона. Анодный ток в этом режиме не превышает единиц мкА.

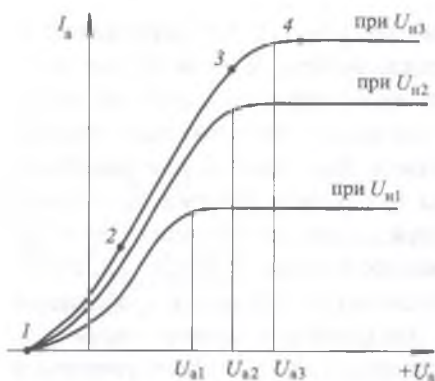


Рис. 2.4. Анодные характеристики электровакуумного диода

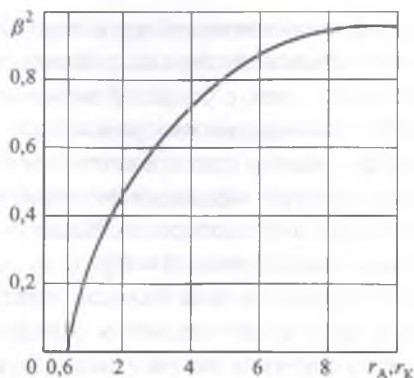


Рис. 2.5. Зависимость параметра β^2 от геометрических размеров анода и катода

Восходящий участок характеристики соответствует работе лампы в режиме пространственного заряда. В этом режиме анодный ток определяют электроны, обладающие энергией для преодоления потенциала $U_{\min}$ (см. рис. 2.3), создаваемого пространственным зарядом у катода. Значение анодного тока в режиме пространственного заряда определяется взаимодействием анодного напряжения и пространственного заряда. На величину анодного тока влияют также геометрические размеры анода и катода, а также их взаимное расположение. Ток анода подчиняется выражению, называемому законом трех вторых, и равен

$$I_a = kU_a^{3/2}, \quad (2.2)$$

где k — коэффициент, зависящий от конструктивного исполнения анода и катода; U_a — анодное напряжение.

Для диодов с плоскими анодом и катодом

$$k = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{S_a}{r_{a-k}^2}, \quad (2.3)$$

где S — площадь поверхности анода; r_{a-k} — расстояние между анодом и катодом.

Для диодов с цилиндрическим исполнением анода и катода

$$k = 14,65 \cdot 10^{-6} \frac{l_a}{r_a \beta^2}, \quad (2.4)$$

где l_a — длина анода; r_a — радиус анода; коэффициент β^2 — параметр, зависящий от конструкции лампы, значение которого представлено на графике рис. 2.5.

2.3. Статические параметры диода

Крутизна характеристики определяется отношением приращения анодного тока к приращению анодного напряжения (рис. 2.6):

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}. \quad (2.5)$$

Иными словами, крутизна показывает насколько изменится анодный ток при изменении анодного напряжения на 1 В. Геометрически крутизна равна тангенсу угла α между касательной к анодной характеристике и осью абсцисс (см. рис. 2.6).

Внутреннее сопротивление R_i переменному току — величина, обратная крутизне:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}. \quad (2.6)$$

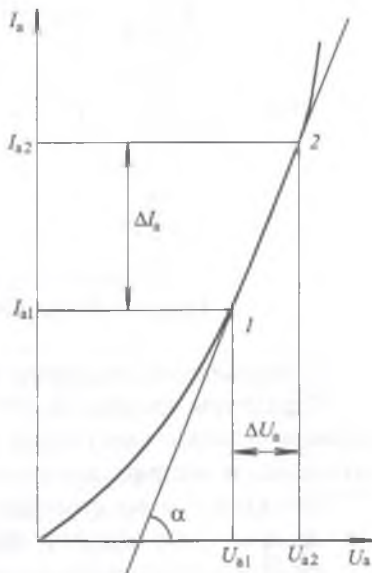


Рис. 2.6. Определение крутизны характеристики диода

Междуэлектродная емкость анод — катод C_{a-k} (рис. 2.7) зависит от геометрических размеров анода и катода, а также расстояния между ними. Емкость C_{a-k} включена параллельно внутреннему сопротивлению лампы R_i . На низких частотах ее действие не учитывается, однако на частотах единицы — десятки МГц C_{a-k} шунтирует R_i , ухудшая частотные свойства диодов.

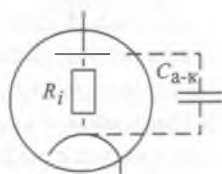


Рис. 2.7. Междуэлектродная емкость диода

2.4. Применение диодов

Свойство диодов проводить ток в одном направлении используется для выпрямления напряжения переменного тока. Диоды, используемые в схемах выпрямления, называют кенотронами. Конструктивно кенотроны выпускают одно- и двуханодными. В настоящее время для питания УЗЧ с потребляемой мощностью более 10 Вт используют двухполупериодную схему выпрямления (рис. 2.8).

Расчет кенотронного выпрямителя лампового УЗЧ проводится в несколько этапов:

- 1) выбор схемы выпрямления и типа кенотрона;
- 2) определение напряжений и токов вторичных обмоток;

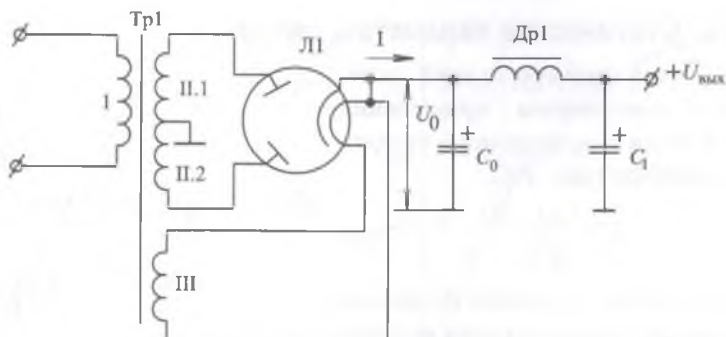


Рис. 2.8. Схема кенотронного выпрямителя

3) определение величины емкости конденсатора фильтра.

Параметры кенотрона, который работает в схеме выпрямителя, должны отвечать следующим условиям:

- значение выпрямленного максимального тока должно быть больше заданного выпрямленного тока;
- максимальное значение обратного напряжения должно быть больше обратного напряжения, действующего в схеме;
- максимальное значение импульса выпрямленного тока должно быть больше импульса тока, действующего в схеме.

В табл. 5 Приложения даны расчетные соотношения выпрямленных значений напряжения U_0 и тока I_0 от обратного напряжения $U_{обр}$ и импульса тока I_{max} . Для наглядности можно привести пример выбора кенотрона, предназначенного для работы в схеме двухполупериодного выпрямителя с выходными параметрами $U_0 = 330$ В, $I_0 = 80$ мА:

а) выпрямленный ток одного плеча выпрямителя

$$I_{1.1} = \frac{I_0}{2} = \frac{80}{2} = 40 \text{ мА};$$

б) обратное напряжение на анодах кенотрона

$$U_{обр} = 3U_0 = 3 \cdot 330 = 990 \text{ В};$$

в) импульс тока

$$I_{max} = 3,5I_0 = 3,5 \cdot 80 = 280 \text{ мА}.$$

Из табл. 2 Приложения можно выбрать несколько приборов, которые удовлетворяют выбранным параметрам, например 5Ц3С, 5Ц4С, 6Ц5С. Полный расчет источника питания, состоящего из выпрямителя, фильтра и электронного стабилизатора, предназначенного для питания лампового УЗЧ приведен в главе 5.

3 ТРИОДЫ

3.1. Устройство и принцип действия триода

Плотность электронного потока в пространстве между анодом и катодом зависит от напряженности электрического поля у катода. Чтобы воздействовать на интенсивность электрического поля у катода, в электронную лампу ввели третий электрод — *сетку*, расположив ее в непосредственной близости у катода. Получившийся трехэлектродный прибор носит название *электровакuumный триод* (рис. 3.1).

В некоторых лампах промежуток между сеткой и катодом составляет доли миллиметра. В триоде интенсивность электрического поля у катода определяется суммарным влиянием полей анода и сетки. Для пояснения распределения электрического поля в межэлектродном пространстве триода необходимо обратиться к рис. 3.2, где $r_{к-с}$ — расстояние между катодом и сеткой, $r_{с-а}$ — расстояние между сеткой и анодом.

Потенциал катода зададим нулевым значением ($U_k = 0$), к аноду триода приложен положительный потенциал $U_a \gg 1$. Для понимания влияния сетки предположим, что в начальный момент она отсутствует. В таком режиме интенсивность электрического поля между катодом и анодом равна распределению интенсивности поля в двухэлектродной лампе — диоде (линия 2). Теперь предположим, что третий электрод (сетка) присутствует и ее потенциал равен нулю ($U_c = 0$). Потенциал поля между анодом и катодом снизится (линия 3), минимум отрицательного потенциала возрастет $|U_{min 2}| > |U_{min 1}|$. В этом режиме на сетку замыкается часть силовых линий электрического поля, направление которых — от анода к катоду. Это ослабляет напряженность электрического поля вблизи катода и приводит к росту тормозящего действия пространственного заряда у катода, что в свою очередь вызывает уменьшение анодного тока. Если подать на сетку

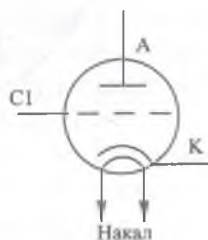


Рис. 3.1. Схемное изображение электровакuumного триода

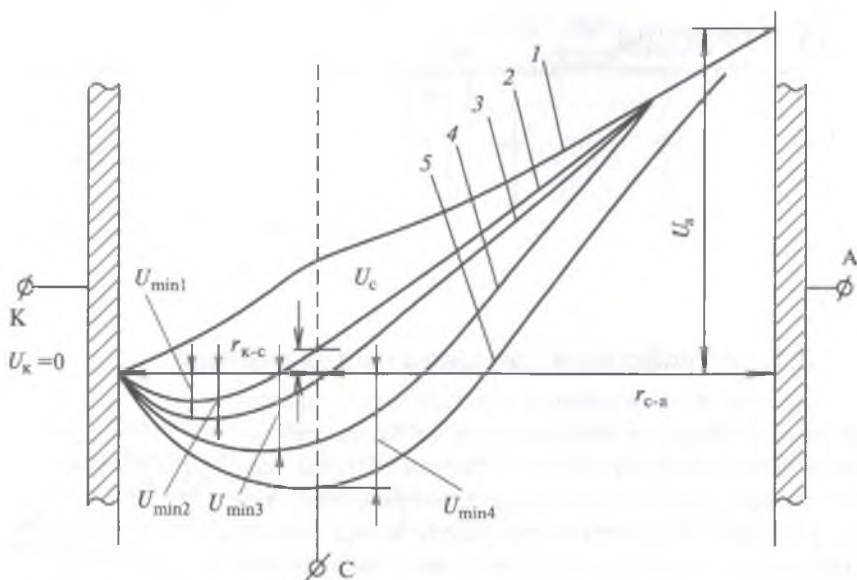


Рис. 3.2. Распределение потенциала в электровакуумном триоде

небольшой отрицательный потенциал (единицы вольт), то это приведет к уменьшению потенциала электрического поля во всех точках пространства между анодом и катодом, а минимум потенциала возрастет до величины $|U_{\min 3}|$ с одновременным смещением к сеточному электроду (линия 4). В этом режиме к тормозящему действию объемного заряда у катода добавится тормозящее действие поля сетки. При этом интенсивность поля у катода снижается и часть эмитированных электронов возвращается обратно на катод. Анодный ток станет еще меньше. Если продолжать увеличивать отрицательный потенциал на сетке, то наступит такой момент (при отрицательном напряжении на сеточном электроде в десятки вольт $U_{\min 4}$), что поле на участке катод – сетка станет полностью тормозящим. Анодный ток в этом режиме станет равным нулю ($I_a = 0$), наступит так называемый режим *отсечки* (линия 5). Если же на сетку подать небольшой положительный потенциал ($U_c > 0$), то электрическое поле анода в этом режиме суммируется с электрическим полем сетки, потенциал всех точек между анодом и катодом увеличится, интенсивность ускоряющего электрического поля вблизи катода возрастет. Под действием этого ускоряющего поля увеличится число электронов, движущихся от катода к сетке, при этом увеличится анодный ток и возникнет небольшой сеточный ток $I_k = I_a + I_c$ (рис. 3.3).

Анализируя рассмотренные выше режимы работы вакуумного триода, можно сделать важный вывод о том, что при изменении сеточного потенциала относительно потенциала катода в небольших пределах можно изменять величину анодного тока от нуля до максимального значения при близкой к нулю мощности в цепи сетки.

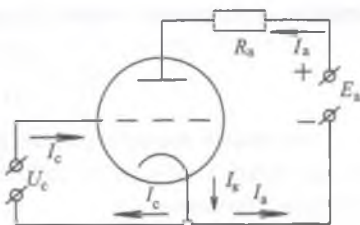


Рис. 3.3. Распределение эмитированного тока в триоде

3.2. Анодные характеристики триода

Анодные характеристики связывают анодный ток и напряжения, приложенные к аноду и сетке. Этими параметрами являются крутизна, внутренние сопротивления, проводимость и коэффициент усиления.

Крутизна S , мА/В, — это зависимость анодного тока при изменении напряжения на сетке при неизменном напряжении на аноде:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \quad \text{при } U_a = \text{const}. \quad (3.1)$$

Крутизна показывает, на сколько миллиампер изменится ток анода при изменении напряжения на сетке на 1 В при неизменном анодном напряжении. Геометрически крутизна есть угол наклона анодно-сеточной характеристики, поэтому она пропорциональна тангенсу угла между касательной к характеристике и осью абсцисс. Крутизна меняется в зависимости от режима работы лампы в силу нелинейности анодно-сеточной характеристики, а также зависит от размеров и формы электродов. Последнее нетрудно получить численно. При отрицательном напряжении на сетке сеточный ток равен нулю, а анодный ток имеет следующее значение:

$$I_a = I_k = k(U_c + DU_a)^{3/2}. \quad (3.2)$$

Производная от I_a по U_c дает следующее выражение для определения крутизны:

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} = \frac{3}{2} k \sqrt{U_c + DU_a} = 3,5 \cdot 10^{-6} \frac{Q_a}{r_{с\kappa}^2} \sqrt{U_c + DU_a}, \quad (3.3)$$

из которого следует, что крутизна возрастает с увеличением площади анода и уменьшением расстояния «сетка – катод».

Внутреннее сопротивление триода R_i характеризует влияние анодного напряжения U_a на анодный ток I_a или, иными словами, по-

казывает сопротивление триода при малом изменении тока анода:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad \text{при } U_c = \text{const}. \quad (3.4)$$

Анодные характеристики триода криволинейны, следовательно, в различных режимах работы внутреннее сопротивление имеет различное значение.

Внутренняя проводимость триода — величина, обратная внутреннему сопротивлению:

$$G_i = \frac{1}{R_i} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \quad \text{при } U_c = \text{const}. \quad (3.5)$$

Проводимость триода, также как и крутизна, показывает, на сколько миллиампер изменится анодный ток при изменении анодного напряжения на 1 В.

Коэффициент усиления триода μ показывает влияние анодного и сеточного напряжений на величину анодного тока:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \quad \text{при } I_a = \text{const}. \quad (3.6)$$

Физически коэффициент усиления показывает, во сколько раз на анодный ток сильнее влияет изменение сеточного напряжения, чем такое же изменение анодного напряжения.

Проницаемость сетки характеризует влияние сеточного и анодного напряжения на ток катода:

$$D = \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a} \quad \text{при } I_k = \text{const}. \quad (3.7)$$

Так как изменение анодного тока в триоде обусловлено изменением напряжений U_a и U_c , то, дифференцируя уравнение (3.2), получим

$$dI_k = \frac{3}{2} k \sqrt{dU_c + D dU_a}. \quad (3.8)$$

В случае одновременного изменения анодного и сеточного напряжений (dU_a , dU_c), ток катода не изменится, т.е. $dI_k = 0$, и уравнение (3.8) примет вид

$$dU_c + D dU_a = 0,$$

откуда

$$D = -\frac{dU_c}{dU_a}. \quad (3.9)$$

Внутреннее уравнение триода — зависимость, связывающая меж-

ду собой основные характеристики анодной цепи. Данное уравнение позволяет по двум известным параметрам найти третий. Внутреннее уравнение триода имеет вид

$$SR_i D = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a} = 1,$$

или

$$SR_i = \mu. \quad (3.10)$$

3.3. Сеточные характеристики триода

Входное сопротивление триода — внутреннее сопротивление участка катод — сетка переменному току:

$$R_{i(k-c)} = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c} \quad \text{при } U_a = \text{const}. \quad (3.11)$$

Крутизна сеточной характеристики (величина, обратная входному сопротивлению):

$$S_c = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_c} \quad \text{при } U_a = \text{const}. \quad (3.12)$$

Проподная проводимость — параметр, который необходимо учитывать при работе триода в режиме с сеточными токами, — зависимость сеточного тока от анодного напряжения:

$$G_{np} = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_a} \quad \text{при } U_c = \text{const}. \quad (3.13)$$

В практике построения радиосхем с применением электронных ламп иногда возникает необходимость параллельного включения однотипных ламп, например в электронных стабилизаторах для разгрузки анодов регулирующих ламп по рассеиваемой мощности. При параллельном включении ламп выходной ток увеличивается в n раз (n — число ламп), крутизна $S_n = nS$, внутреннее сопротивление

$$R_n = \frac{R_i}{N},$$

коэффициент усиления остается неизменным:

$$\mu = \mu_n = S_n R_n = \frac{nSR_i}{N} = SR_i. \quad (3.14)$$

3.4. Графический метод определения параметров триода

Графический метод определения параметров триода является наиболее доступным, так как необходимые при этом семейства графи-

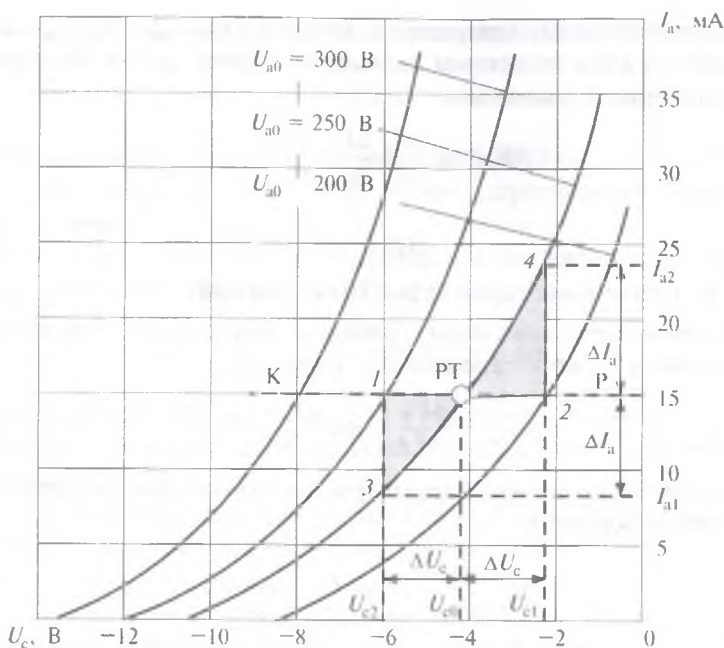


Рис. 3.4. Графический способ определения параметров триода по сеточным характеристикам

ков анодно-сеточных и анодных характеристик всегда можно найти в справочниках по электронным лампам. Наиболее удобным является метод двух характеристических треугольников. Для определения параметров триода через рабочую точку РТ (рис. 3.4) проведем прямую, параллельную оси абсцисс, до ее пересечения со смежными характеристиками семейства (точки 1 и 2). Через полученные точки проводим прямые параллельные оси ординат до пересечения с характеристикой, на которой расположена рабочая точка РТ (точки 3 и 4). В результате построений получены два характеристических треугольника, катеты которых представляют собой приращения напряжений и токов (ΔI_a , ΔU_c , ΔU_a), необходимые для расчетов значений параметров триода в рабочей точке.

Из графика анодно-сеточных характеристик (см. рис. 3.4) следует, что при изменении сеточного потенциала от U_{c2} до U_{c1} анодный ток должен увеличиться. Однако изменение сеточного потенциала компенсируется изменением анодного напряжения таким образом, что величина анодного тока остается неизменной. Отсюда вытекает формула нахождения коэффициента усиления для режима рабочей точки

РТ при $I_{a0} = \text{const}$:

$$\mu = \left| \frac{2\Delta U_a}{2\Delta U_c} \right| = \left| \frac{U_{a2} - U_{a1}}{U_{c2} - U_{c1}} \right| = \left| \frac{300 - 200}{-6 - (-2,5)} \right| = \left| \frac{100}{-3,5} \right| = 28,57 \approx 28,6.$$

При изменении сеточного потенциала от U_{c2} (точка 3) до U_{c1} (точка 4) величина анодного тока изменяется от I_{a1} до I_{a2} , следовательно, среднее значение крутизны в рабочей точке при $U_{a0} = 250$ В

$$S = \left| \frac{2\Delta I_a}{2\Delta U_c} \right| = \left| \frac{I_{a2} - I_{a1}}{U_{c2} - U_{c1}} \right| = \left| \frac{23,5 - 8,5}{-6 - (-2,5)} \right| = \left| \frac{15}{-3,5} \right| = 4,286 \approx 4,3 \frac{\text{мА}}{\text{В}}.$$

При изменении анодного напряжения от U_{a1} до U_{a0} и постоянном напряжении на сетке ($U_c = \text{const}$), ток анода изменяется от значения I_{a0} (точка 2) до значения I_{a2} (точка 4), следовательно, среднее значение внутреннего сопротивления в рабочем режиме при $U_c = -2,5$ В

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a0} - U_{a1}}{I_{a2} - I_{a0}} = \frac{250 - 200}{23,5 - 15} = \frac{50}{8,5} = 5882,353 \text{ Ом} \approx 5,9 \text{ кОм}.$$

Пример построения характеристических треугольников на графике семейства анодных характеристик приведен на рис. 3.5.

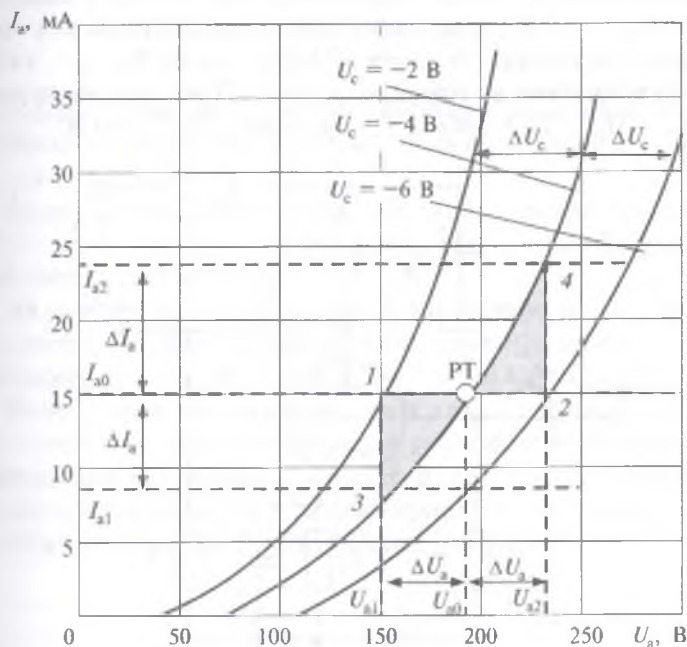


Рис. 3.5. Графический способ определения параметров триода по анодным характеристикам

Катеты этих треугольников позволяют, как и в вышеуказанном примере, получить приращения величин (ΔI_a , ΔU_c , ΔU_a), необходимых для вычисления коэффициента усиления (μ), крутизны (S) и внутреннего сопротивления триода в рабочей точке (РТ).

3.5. Практические расчеты каскадов на триодах

3.5.1. Предварительный каскад

Реализуемые в радиолюбительской практике ламповые УЗЧ практически всегда являются многокаскадными, причем первые несколько каскадов служат для предварительного усиления входных сигналов, или, иными словами, являются каскадами усиления напряжения. Предварительные каскады целесообразно строить по схемотехнике резистивных каскадов усиления, обеспечивающих в полосе звуковых частот 30...16000 Гц равномерное усиление входного сигнала при малой неравномерности фазочастотной характеристики. Резистивные каскады не требуют дефицитных компонентов и просты в исполнении. Схема резистивного каскада приведена на рис. 3.6.

Для примера рассчитаем каскад предварительного усиления сигналов ЗЧ на половине двойного триода типа 6НЗП при следующих начальных условиях: входное напряжение $U_{вх} = 0,3$ В; выходное напряжение $U_{вых} = 6,0$ В (такое напряжение предназначено для «раскачки» оконечного каскада на лампе 6П14П); $f_n = 60$ Гц, $f_v = 14000$ Гц, частотные искажения на границах полосы ЗЧ не должны превышать 1 дБ ($M_n = M_v = 1,12$, табл. 1 Приложения), $E_A = 210$ В.

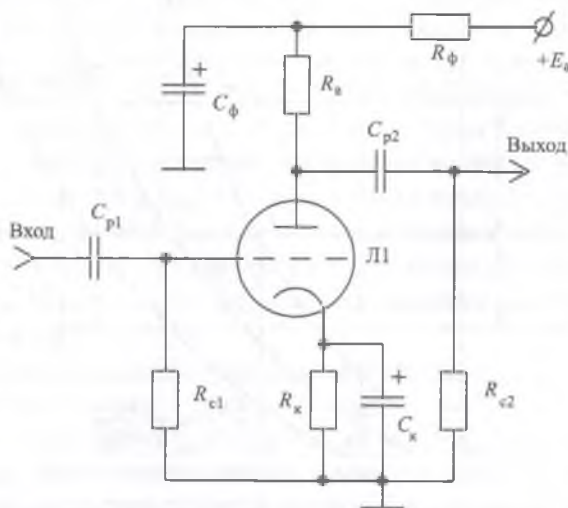


Рис. 3.6. Резистивный каскад усиления на триоде

1. Коэффициент усиления каскада $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = 6,0/0,3 = 20$.

2. Выберем сопротивление анодной нагрузки R_a , учитывая, что слишком большое значение R_a ведет к увеличению усиления с одновременным сужением полосы пропускания в области верхних частот: $R_a = (3...4)R_i = 4 \cdot 6,1 = 24,4$ кОм, выбираем из стандартного ряда $R_a = 24$ кОм. Величины внутреннего сопротивления для различных электронных ламп приведены в табл. 3 Приложения.

3. При числе усилительных каскадов больше одного в анодные цепи каждого каскада необходимо включать дополнительные развязывающие фильтры $R_{\Phi}C_{\Phi}$, предназначенные для предотвращения возникновения паразитных обратных связей через источник анодного напряжения.

$$R_{\Phi} = (0,1...0,5)R_a = 0,3 \cdot 24,4 = 7,32 \text{ кОм.}$$

Из стандартного ряда выбираем $R_{\Phi} = 7,5$ кОм;

$$C_{\Phi} = \frac{(2...5) \cdot 10^4}{f_n R_{\Phi}} \text{ мкФ,}$$

где R_{Φ} в кОм;

$$C_{\Phi} = \frac{3 \cdot 10^4}{60 \cdot 7,5} = \frac{30000}{450} = 66,6 \text{ мкФ.}$$

Из стандартного ряда выбираем конденсатор с номиналом 68 мкФ.

4. Общее сопротивление в анодной цепи $R'_a = R_a + R_{\Phi} = 24 + 7,5 = 31,5$ кОм;

5. Смещение на управляющей сетке лампы выбираем из равенства $-U_c = -(U_{\text{нх}} + (0,5 + 1,5)) = -(0,25 + 1,5) = -1,75$ В, ближайшее значение сеточного смещения $-U_c = -2$ В.

6. На графике семейства анодных характеристик строим нагрузочную линию для значения анодной нагрузки R'_a , при котором анодный ток равен $I'_a = U_a/R'_a = 210/31500 = 6,6$ мА (рис. 3.7).

7. Точка 1 пересечения нагрузочной линии с кривой выбранного значения сеточного смещения является рабочей точкой триода. В рабочей точке режимы лампы $U_{a0} = 116$ В, $I_{a0} = 3$ мА. Для рабочей точки найдем коэффициент усиления триода μ_d , крутизну S_d , внутреннее сопротивление $R_{ид}$. Коэффициент усиления

$$\mu_d = \frac{U_1 - U_2}{\Delta U_c} = \frac{116 - 85}{1} = 31,$$

где U_1, U_2 — анодные напряжения в точках 1 и 2 соответственно, ΔU_c — разность сеточных напряжений для точек 1 и 2.

Ток анода, мА

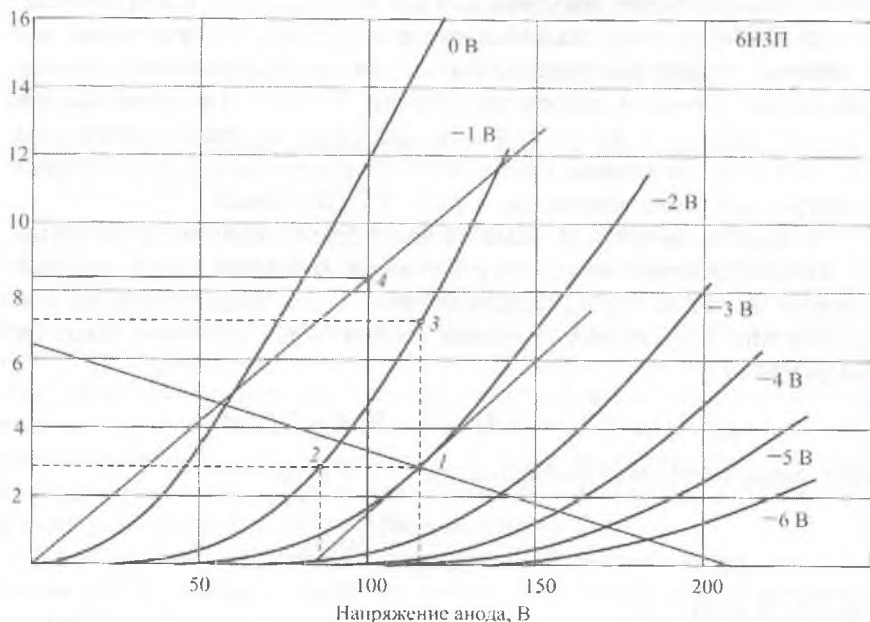


Рис. 3.7. Построение нагрузочной линии для анодной нагрузки 6НЗП

Крутизна триода находится из отношения разницы анодных токов для точек 1 и 3 к соответствующей разности сеточных токов:

$$S_d = \frac{I_{a3} - I_{a1}}{\Delta U_c} = \frac{7,4 - 3}{1} = 4,4 \text{ мА/В.}$$

Для определения внутреннего сопротивления триода необходимо провести касательную к анодной характеристике в рабочей точке, а затем параллельную ей прямую, исходящую из начала координат ($I_a = 0$, $U_a = 0$). Для этой параллельной прямой выберем произвольную точку 4 с параметрами $U_a = 100 \text{ В}$, $I_a = 8,6 \text{ мА}$:

$$R_{i\text{д}} = \frac{100}{8,6} = 11,63 \text{ кОм.}$$

8. Сопротивление резистора сеточного смещения

$$R_{c1} = (5 \dots 10) R_a = 7 \cdot 24 = 168 \text{ кОм.}$$

Так как следующий каскад за триодным оконечный (последний), то R_{c2} (сопротивление утечки) можно выбрать по справочнику. Для 6П14П при выходной мощности до 8 Вт $R_{c\text{max}} = 300 \text{ кОм}$, поэтому для удобства построения УЗЧ выберем $R_{c1} = R_{c2} = 160 \text{ кОм}$. Ве-

личины разделительных конденсаторов $C_{c1,2}$, нФ, рассчитываются из соотношения

$$C_p = \frac{10^6}{2\pi f_n R_c \sqrt{M_n^2 - 1}},$$

где f_n — нижняя частота усиливаемой полосы частот, Гц; R_c — сопротивление утечки сетки следующего каскада, кОм:

$$C_{p1} = C_{p2} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 160 \sqrt{1,12^2 - 1}} = \frac{10^6}{30409,27} = 32,885 \text{ нФ}.$$

Выбираем из стандартного ряда конденсаторы номиналом 33 нФ.

9. Истинный коэффициент усиления триода в выбранном режиме

$$K = \frac{\mu_d}{ds1 + \frac{R_{id}}{R_a} + \frac{R_{id}}{R_c}} = \frac{31}{1 + \frac{11,63}{24,4} + \frac{11,63}{160}} = \frac{31}{1 + 0,477 + 0,073} = 20.$$

При таком коэффициенте усиления выходное напряжение каскада

$$U_{\text{вых}} = KU_{\text{вх}} = 20 \cdot 0,3 = 6,0 \text{ В}.$$

В результате расчетов коэффициент усиления и выходное напряжение каскада оказались равными величинам, которые предполагались в начале расчетов.

10. Осталось рассчитать элементы цепи автоматического смещения R_k и C_k :

$$R_k = \frac{1000|U_c|}{I_{a0}} = \frac{1000 \cdot 2}{3} = 666,6 \text{ Ом},$$

из стандартного ряда выбираем резистор с номиналом 680 Ом;

$$C_k \geq \frac{35 \cdot 10^3}{R_{id} f_n (1 + R_a/R_{id})}, \text{ мкФ},$$

где R_{id} — внутреннее сопротивление в нагрузочном режиме, рассчитанное ранее в кОм.

$$C_k \geq \frac{35 \cdot 10^3}{11,63 \cdot 60 \cdot (1 + 24,4/11,63)} = \frac{35000}{697,8 \cdot 3,1} = \frac{35000}{2163,18} = 16,18 \text{ мкФ}.$$

Из стандартного ряда выбираем конденсатор с номиналом 22 мкФ.

На рис. 3.8 представлена схема предварительного усилителя ЗЧ с рассчитанными выше номиналами радиоэлементов.

Для облечения процедуры расчета предварительного каскада на триоде (а в дальнейшем и других каскадов) возможно применение процедурного метода программирования. Этот метод заключается в том,

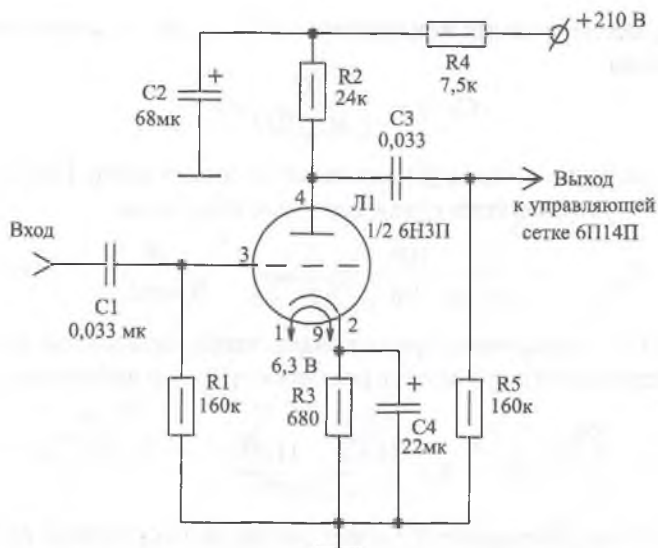


Рис. 3.8. Принципиальная схема резистивного каскада на триоде

```

begin
// получить исходные данные из полей ввода
VIN := StrToFloat(Edit1.Text);
VOUT := StrToFloat(Edit2.Text);
RI := StrToFloat(Edit3.Text);
FRN := StrToInt(Edit4.Text);
UA := StrToFloat(Edit5.Text);
// вычисление первой группы параметров усилителя на триоде
KU := VOUT/VIN; // коэффициент усиления каскада
RA := 4*RI; // сопротивление анодной нагрузки
RF := 0.3*RA; // сопротивление фильтра
CF := MC/(FRN*RF); // емкость конденсатора фильтра
RAF := RA+RF; // полное сопротивление в цепи анода
IA := UA/RAF; // анодный ток
// вывод результатов вычислений
label6.Caption := 'коэффициент усиления' + FloatToStr(KU) +
'сопротивление анодной нагрузки' + FloatToStr(RA) + 'кОм' +
'сопротивление фильтра' + FloatToStr(RF) + 'кОм' +
'емкость фильтра' + FloatToStr(CF) + 'мкФ' +
'полное сопротивление в цепи анода' + FloatToStr(RAF) + 'кОм' +
'анодный ток' + FloatToStr(IA) + 'мА';
end;

```

Рис. 3.9. Листинг первой подпрограммы расчета резистивного каскада на триоде

что общая задача делится на несколько подзадач, при этом результаты решения предыдущей подзадачи используются как входные величины

7. Triod_pred_1sub

Входное напряжение, В: 0.24

Выходное напряжение, В: 6.4

Внутреннее сопротивление триода, кОм: 6.45

Нижняя частота полосы усиления, Гц: 60

Напряжение анодного источника, В: 240.6

коэффициент усиления 26,67
сопротивление анодной нагрузки 25,8 кОм
сопротивление фильтра 7,74 Ом
емкость 64,60 мкФ
полное сопротивление в цепи анода 33,54 кОм
анодный ток 7,17 мА

Вычислить

Выход

Рис. 3.10. Скриншот первой подпрограммы расчета резистивного каскада на триоде

```
begin;
// получение исходных данных из полей ввода
FN := StrToInt(Edit1.Text);
RI := StrToFloat(Edit2.Text);
RD := StrToFloat(Edit3.Text);
UC := StrToFloat(Edit4.Text);
IA := StrToFloat(Edit5.Text);
MN := StrToFloat(Edit6.Text);
KU := StrToFloat(Edit7.Text);
RA := StrToFloat(Edit8.Text);
// Вычисление номиналов элементов усилителя
RF := 0.3*RA;
RC := 7*RA;
CR := A/(6.2831*FN*RC*sqrt((MN*MN)-1)); // разделительный конденсатор
CK := 35000/RD*FN*(1+RA/RD); // конденсатор цепи автосмещения
RK := 1000*UC/IA; // резистор автосмещения
// Вычисление коэффициента усиления в рабочем режиме
KT := KU/(1+(RI/RA)+(RI/RC));
// Вывод результатов расчетов
label9.Caption := 'Разделительный' + FloatToStrF(CR,ffFixed,3,2) + 'нФ' +
'Емкость автосмещения' + FloatToStrF(CK,ffFixed,4,2) + 'мкФ' +
'Резистор автосмещения' + FloatToStrF(RK,ffFixed,4,1) + 'Ом' +
'Резистор сеточный' + FloatToStrF(RC,ffFixed,4,1) + 'кОм' +
'Усиление' + FloatToStrF(KT,ffFixed,3,1);
end;
```

Рис. 3.11. Листинг второй подпрограммы расчета резистивного каскада на триоде

7' Triod_pred_2sub

Нижняя частота полосы усиления, Гц	60
Внутреннее сопротивление триода, кОм	6.1
Внутреннее динамическое сопротивление триода, кОм	11.63
Напряжение смещения первой сетки, В	2
Ток анода в рабочей точке, мА	3.0
Неравномерность АЧХ на границах полосы усиления	1.12
Коэффициент усиления триода	31
Анодная нагрузка, кОм	31.5

Фильтр: 61,73 мкФ Разделительный: 23,90 нФ Емкость
автосмещения: 636,05 мкФ Резистор
автосмещения: 666,70 Ом Резистор
сеточный: 220,5 кОм Резистор фильтра: 9,4 кОм Усиление: 25,4

Рис. 3.12. Скриншот второй подпрограммы расчета резистивного каскада на триоде

для последующей подзадачи. Этот метод хорошо подходит для задач расчета каскадов на электронных лампах. При этих расчетах сначала рассчитываются параметры каскада для построения нагрузочной характеристики, а затем, используя величины, полученные с помощью нагрузочной характеристики, рассчитывают величины радиоэлементов усилительного каскада. На рис. 3.9 представлен листинг первой подпрограммы расчета предварительного усилителя на триоде, созданной в среде программирования Borland Delphi ver. 7.0.

В результате работы программы выводятся следующие параметры: необходимый коэффициент усиления K_U , сопротивление резистора анодной нагрузки R_A в кОм, емкость конденсатора фильтра C_F в мкФ, сопротивление резистора фильтра R_F в кОм, полное сопротивление в цепи анода R_{AF} в кОм и анодный ток I_A в мА. Скриншот первой подпрограммы расчета предварительного УЗЧ представлен на рис. 3.10.

На рис. 3.11 представлен листинг второй подпрограммы расчета предварительного усилителя на триоде.

В результате работы подпрограммы расчета параметров предва-

рительного УЗЧ на триоде выводятся следующие параметры: емкость разделительного конденсатора C_R в нФ, сопротивление резистора автоматического смещения R_K в Ом, емкость конденсатора в цепи автоматического смещения C_K в мкФ, сопротивление резистора сеточного смещения R_C в кОм и усиление триода в рабочей точке K_U . Скриншот второй подпрограммы расчета предварительного УЗЧ представлен на рис. 3.12.

3.5.2. Оконечный однотактный каскад

Типовая схема однотактного оконечного каскада, выполненного по трансформаторной схеме, позволяющего согласовать выходное сопротивление каскада с сопротивлением нагрузки, приведена на рис. 3.13.

Исходными данными для расчета выходного каскада на триоде являются полезная выходная мощность $P_{\text{вых}}$, ВА, активное сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, Ом, граничные частоты полосы усиления $f_{\text{н}}$, $f_{\text{в}}$, Гц, допустимые частотные искажения на граничных частотах полосы усиления $M_{\text{н}}$, $M_{\text{в}}$, допустимый коэффициент нелинейных искажений $K_{\text{ни}}$, %.

Типовой расчет оконечного каскада УЗЧ с трансформаторным выходом. Исходные данные: выходная лампа типа 6С3ЗС с $P_{\text{а.доп}} = 60$ Вт, $R_i = 130$ Ом. Необходимо получить на выходе значение полезной мощности $P_{\text{вых}} = 5,0$ ВА на сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}} = 8$ Ом. Граничные частоты полосы усиления $f_{\text{н}} = 70$ Гц, $f_{\text{в}} = 13000$ Гц при неравномерности АЧХ на граничных частотах $M_{\text{н}} = M_{\text{в}} = 1,12$. Допустимый коэффициент нелинейных искажений $K_{\text{ни}} \leq 5$ %.

Выполним типовой расчет оконечного каскада.

1. Сопротивление анодной нагрузки

$$R_a = (2 \dots 5) R_i = 3 R_i = 3 \cdot 130 = 390 \text{ Ом.}$$

2. Ориентировочное значение мощности рассеяния на аноде 6С3ЗС

$$P_a = 3P \frac{2 + \alpha}{\alpha} = 3 \cdot 5 \cdot \frac{2 + 3}{3} = 20,05 \text{ Вт.}$$

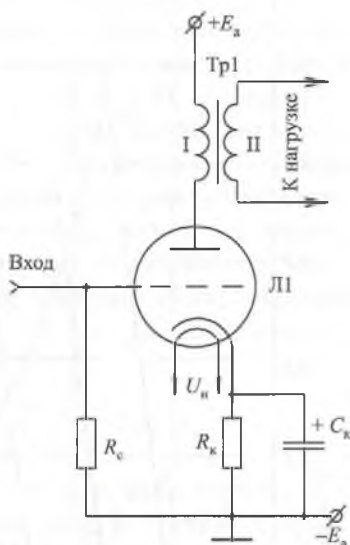


Рис. 3.13. Однотактный оконечный каскад

3. Сеточное напряжение смещения

$$U_{\text{см}} = |E_c| = \frac{1 + \alpha}{\mu} \sqrt{\frac{2PR_i}{\alpha}} = \frac{1 + 3}{2,5} \sqrt{\frac{2 \cdot 5 \cdot 130}{3}} = 1,6 \cdot \sqrt{433,3} = 33,28 \text{ В.}$$

Выбираем на семействе анодных характеристик ближайшую характеристику при $|E_c| = 30 \text{ В}$ (рис. 3.14).

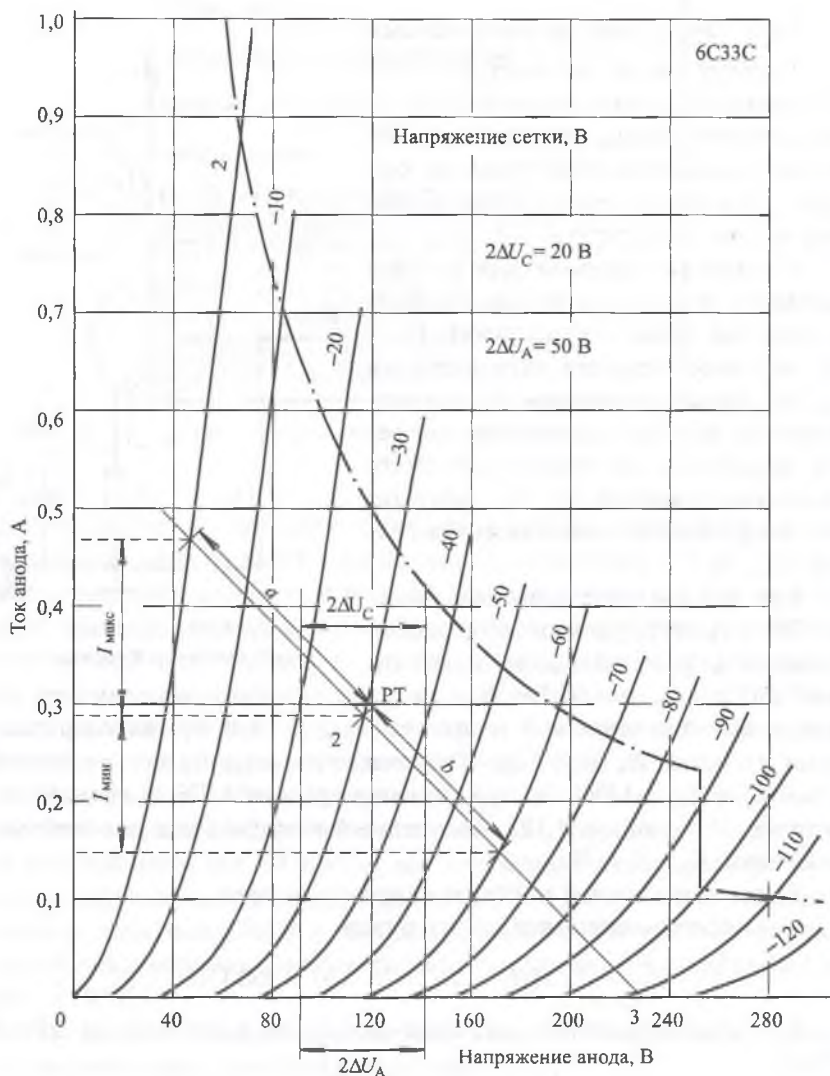


Рис. 3.14. Построение нагрузочной линии для 6С33С

4. Анодное напряжение триода

$$U_{a0} = 1,1(\alpha + 2)\sqrt{2PR_i/\alpha} = 5,5\sqrt{433,3} = 114,455 \approx 115 \text{ В.}$$

5. Для дальнейших расчетов необходимо построить динамическую характеристику. На оси анодных напряжений отложим отрезок, равный значению анодного напряжения $U_{a0} = 115 \text{ В}$ (точка 1). Из этой точки восстановим перпендикуляр до пересечения с характеристикой лампы при значении напряжения смещения $U_{cm} = -30 \text{ В}$ (точка 2). Точка 2 является рабочей точкой лампы. Проекция точки 2 на ось анодных токов определяет значение анодного тока $I_{a0} = 293,75 \text{ мА}$. Затем от точки 1 отложим значение напряжения $U' = I_{a0}R_a = 0,29375 \cdot 390 = 114,56 \approx 115 \text{ В}$ (точка 3). Через точки 2 и 3 проведем прямую линию. Отрезок прямой линии, заключенный между характеристикой при $U_{cm} = -2 \text{ В}$ и удвоенным расчетным сеточным смещением $2U_{cm} = -60 \text{ В}$, является динамической нагрузочной характеристикой. По динамической нагрузочной характеристике можно определить значение коэффициента нелинейных искажений для рабочей точки. Для этого нужно измерить длины отрезков a, b (см. рис. 3.14). В нашем случае $a = 39, b = 31$. Коэффициент нелинейных искажений (в процентах)

$$K_{ни} = 50 \frac{a - b}{a + b} = 50 \frac{39 - 32}{39 + 32} = \frac{50 \cdot 7}{71} = 4,92 \text{ \%}.$$

Полученное значение $K_{ни}$ меньше заданного. В случае, если $K_{ни}$ получился больше заданного значения, необходимо увеличить коэффициент α и пересчитать заново значения U_{cm}, U_{a0} и I_{a0} .

6. Уточним значение мощности рассеяния на аноде при отсутствии сигнала:

$$P'_a = I_{a0}U_{a0} = 0,29375 \cdot 114,56 = 33,65 \text{ Вт.}$$

Полученная величина не превышает значения предельно допустимой мощности рассеяния на аноде 6С33С, равного $P_{a,доп} = 60 \text{ Вт}$.

7. Определим амплитуду анодного тока, вычислив по графику динамической характеристики значения токов I_{min} и I_{max} :

$$I_1 = \frac{I_{min} + I_{max}}{2} = \frac{175 + 139,5}{2} = 157,25 \text{ мА.}$$

8. Значение полезной выходной мощности, которую отдает в нагрузку каскад,

$$P_{вых} = \frac{\eta_{гр} R_a I_1^2}{2 \cdot 10^6} = \frac{0,8 \cdot 390 \cdot 157,25^2}{2 \cdot 10^6} = 3,858 \text{ Вт.}$$

9. Сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора

$$r_1 = \alpha R_i \frac{1 - \eta_{\text{ТР}}}{2} = 3 \cdot 130 \cdot \frac{1 - 0,8}{2} = 39 \text{ Ом.}$$

10. Напряжение источника анодного питания

$$E_a = U_{a0} + I_{a0} r_1 + |E_c| = 114,56 + 0,29375 \cdot 39 + 30 = 156 \text{ В.}$$

11. Согласно паспортным характеристикам наибольшее сопротивление резистора в цепи сетки может составлять 200 кОм, поэтому целесообразно выбрать его номинал меньшего значения, например 130 кОм.

12. Номиналы цепи автоматического смещения:

$$R_k = \frac{1000 |E_c|}{I_{a0}} = \frac{1000 \cdot 30}{293,75} = 102,12 \text{ Ом;}$$

$$P_k = \frac{|E_c| I_{a0}}{1000} = \frac{30 \cdot 293,75}{1000} = 8,81 \text{ Вт,}$$

из стандартного ряда выбираем резистор с номинальным сопротивлением 100 Ом и мощностью рассеяния 10 Вт;

$$C_k \geq \frac{\mu \cdot 10^6}{R_i f_n (1 + \alpha)} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{130 \cdot 70 \cdot (1 + 3)} = 68,7 \text{ мкФ,}$$

из стандартного ряда выбираем электролитический конденсатор с номинальной емкостью 100 мкФ.

13. Вычислим величину эквивалентного сопротивления, необходимую для определения индуктивности первичной обмотки выходного трансформатора:

$$R_3 = \frac{R_a (R_i + 2r_1)}{R_a + R_i + 2r_1} = \frac{390 \cdot (130 + 2 \cdot 39)}{390 + 130 + 2 \cdot 39} = 135,65 \text{ Ом.}$$

14. Индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора

$$L_1 = \frac{R_3}{2\pi f_n \sqrt{M_n^2 - 1}} = \frac{135,65}{2 \cdot 3,14 \cdot 70 \sqrt{1,12^2 - 1}} = 0,612 \text{ Гн.}$$

15. Индуктивность рассеяния

$$L_s \leq \frac{R_i (1 + \alpha) \sqrt{M_n^2 - 1}}{2\pi f_n} = \frac{130(1 + 3) \sqrt{1,12^2 - 1}}{2 \cdot 3,14 \cdot 13000} = 3,212 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

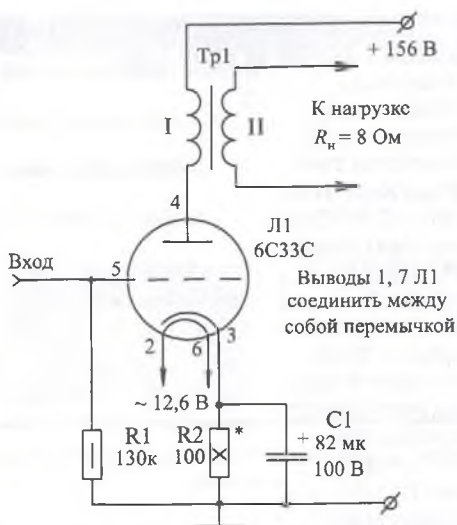


Рис. 3.15. Принципиальная схема оконечного каскада

16. Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$n = \sqrt{\frac{R_{\text{н}}}{\eta_{\text{rp}} R_{\text{a}}}} = \sqrt{\frac{8}{0,8 \cdot 390}} = 0,160.$$

Принципиальная схема оконечного усилителя ЗЧ на триоде типа 6С33С приведена на рис. 3.15.

```
begin
// получение исходных данных из полей ввода
RI := StrToFloat(Edit1.Text);
POUT := StrToFloat(Edit2.Text);
ALFA := StrToInt(Edit3.Text);
KU := StrToFloat(Edit4.Text);
// расчеты параметров
RA := 3*RI; // сопротивление анодной нагрузки
PAR := (3*POUT*(2+ALFA))/ALFA; // мощность рассеяния на аноде
USM := ((1+ALFA)/KU)*Sqrt((2*POUT*RI)/ALFA); // сеточное смещение
UA0 := 1.1*(ALFA+2)*Sqrt((2*POUT*RI)/ALFA); // анодное напряжение
// вывод результата
label5.Caption := 'анодная нагрузка' + FloatToStr(RA) + ' Ом' +
'мощность на аноде' + FloatToStr(PAR) + ' Вт' +
'сеточное смещение' + FloatToStr(USM) + ' В' + 'анодное напряжение ' +
FloatToStr(UA0) + ' В';
end;
```

Рис. 3.16. Листинг первой подпрограммы расчета оконечного одноконтурного каскада

```

begin
// получение исходных данных из полей ввода
A := StrToInt(Edit1.Text);
B := StrToInt(Edit2.Text);
IA0 := StrToFloat(Edit3.Text);
UA0 := StrToFloat(Edit4.Text);
IMIN := StrToFloat(Edit5.Text);
IMAX := StrToFloat(Edit6.Text);
RA := StrToFloat(Edit7.Text);
USM := StrToFloat(Edit8.Text);
FN := StrToInt(Edit9.Text);
MN := StrToFloat(Edit10.Text);
FV := StrToInt(Edit11.Text);
MV := StrToFloat(Edit12.Text);
RI := StrToFloat(Edit13.Text);
RN := StrToInt(Edit14.Text);
ALF := StrToInt(Edit15.Text);
KU := StrToFloat(Edit16.Text);
// выполнение инструкций
KNI := 50*((A-B)/(A+B));
PAT := IA0*UA0;
I1 := (IMIN+IMAX)/2;
POUT := (0.8*RA*I1*I1)/2;
R1 := 0.1*ALF*RI;
EA := UA0+USM+(IA0*R1);
RK := USM/IA0;
PRK := USM*IA0;
CF := (KU*CHISL)/(RI*FN*(1+ALF));
RE := (RA*(RI+(2*R1)))/(RA+RI+(2*R1));
L1 := RE/(2*pi*FN*Sqrt(MN*MN-1));
LS := (RI*(1+ALF)*Sqrt(MV*MV-1))/(2*pi*FV);
NTR := Sqrt(RN/(0.8*RA));
// вывод результатов расчетов
label16.Caption :=
'нелин искажения' + FloatToStrF(KNI,ffFixed,3,2) + '%' +
'мощность на аноде' + FloatToStrF(PAT,ffFixed,3,2) + 'Вт' +
'амплитуда тока' + FloatToStr(I1) + 'А' +
'мощность в нагрузке' + FloatToStr(POUT) + 'Вт' +
'первичная обмотка' + FloatToStrF(R1,ffFixed,5,2) + 'Ом' +
'анодное питание' + FloatToStr(EA) + 'В' +
'резистор автосмещения' + FloatToStrF(RK,ffFixed,5,2) + 'Ом' +
'мощность рез автосмещ' + FloatToStr(PRK) + 'Вт' +
'конт автосмещения' + FloatToStrF(CF,ffFixed,5,2) + 'мкФ' +
'эквив сопротивление' + FloatToStrF(RE,ffFixed,5,2) + 'Ом' +
'инд 1 обмотки' + FloatToStrF(L1,ffFixed,5,4) + 'Гн' +
'инд рассеяния' + FloatToStrF(LS,ffFixed,5,4) + 'Гн' +
'коэфф транс' + FloatToStrF(NTR,ffFixed,4,3);
end;

```

Рис. 3.17. Листинг второй подпрограммы расчета оконечного одноконтурного каскада

7' Triod_1takt_1sub

Внутреннее сопротивление триода, Ом	130,5
Выходная полезная мощность, Вт	15,4
Значение коэффициента альфа	3
Коэффициент усиления триода	2,6

анодная нагрузка 391,50 мОм
мощность на аноде 278 Вт
сеточное смещение 33,358 В
анодное напряжение 119,28 В

Вычислить

Выход

Рис. 3.18. Скриншот первой подпрограммы расчета оконечного однотактного каскада

7' Триод выходной однотактный 2sub

Длина отрезка а, мм	39	Нижняя частота полосы усиления, Гц	60
Длина отрезка b, мм	32	Неравномерность АЧХ на нижней частоте	1,12
Анодный ток в рабочем режиме, А	0,29	Верхняя частота полосы усиления, Гц	14000
Анодное напряжение в раб режиме, В	114,5	Неравномерность АЧХ на верхней частоте	1,12
Ток анода I _{MIN} , А	0,139	Внутреннее сопротивление, Ом	130,2
Ток анода I _{MAX} , А	0,174	Сопротивление нагрузки, Ом	8
Анодная нагрузка, Ом	390	Коэффициент альфа	3
Напряжение смещения, В	28,8	Коэффициент усиления триода	2,6

нелинейные искажения 4,93%
мощность на аноде 33,208 Вт
амплитуда тока 0,1555 А
мощность в нагрузке 3,820791 Вт
первичная обмотка 39,060 мОм
анодное питание 154,62748 В
резистор автосмещения 99,310 мОм
мощность резист автосмещ 8,3528 Вт
конд. автосмещения 83,21 мкФ
эквив. сопротивление 135,790 мОм
1 обмотки 0,7141 Гн
инд. рассеяния 0,0030 Гк
коэф транс 0,160

Вычислить

Выход

Рис. 3.19. Скриншот второй подпрограммы расчета однотактного оконечного каскада

На рис. 3.16 представлен листинг первой подпрограммы расчета однотактного выходного каскада на триоде, в результате работы ко-

торой выводятся параметры: сопротивление анодной нагрузки R_A в кОм, приблизительное значение мощности рассеяния на аноде P_{AR} в Вт, напряжение сеточного смещения U_{SM} в В, величина анодного напряжения U_{A0} в В.

На рис. 3.17 представлен листинг второй подпрограммы расчета однотактного оконечного каскада на триоде, в результате работы которой выводятся параметры: коэффициент нелинейных искажений K_{NI} , мощность рассеяния на аноде в Вт, амплитуда анодного тока I_1 в А, полезная мощность в нагрузке P_{OUT} в Вт, сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора R_1 в Ом, напряжение источника анодного питания E_A в В, сопротивление резистора автоматического смещения R_K в Ом и его мощность P_{RK} в Вт, емкость конденсатора цепи автоматического смещения C_F в мкФ, эквивалентное сопротивление R_E в Ом, индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора L_1 в Гн, индуктивность рассеяния L_S в Гн, коэффициент трансформации выходного трансформатора N_{TR} .

Скриншот первой подпрограммы расчета однотактного оконечного каскада на триоде представлен на рис. 3.18.

Скриншот второй подпрограммы расчета однотактного оконечного каскада на триоде представлен на рис. 3.19.

3.5.3. Оконечный двухтактный каскад

Типовая схема двухтактного оконечного каскада на триодах с фиксированным смещением приведена на рис. 3.20.

Данные для расчета: выходные триоды типа 6С4С, выходная мощность $P_{\text{вых}} = 6$ Вт, сопротивление нагрузки $R_n = 8$ Ом, граничные частоты полосы усиления $f_n = 100$ Гц, $f_v = 15000$ Гц, неравномерность АЧХ на граничных частотах $M_n = M_v = 1,12$, коэффициент нелинейных искажений $K_{\text{ни}} \leq 6\%$.

1. Ориентировочное значение мощности рассеяния на аноде каждого триода

$$P_{a \max} = \frac{2P_{\text{вых}}}{9\eta_{\text{тр}}} \left(1 + \frac{\alpha_0}{\alpha}\right)^2,$$

где $\eta_{\text{тр}} = 0,8$ — КПД выходного трансформатора; α_0 и α — коэффициенты, связанные соотношением $\alpha_0/\alpha = 0,25$, для получения максимальной мощности в нагрузке при минимальном анодном напряжении они соответственно равны:

$$\alpha_0 = \frac{4}{4 + \mu} = \frac{4}{4 + 4,15} = 0,491; \quad \alpha = \frac{\alpha_0}{0,25} = \frac{0,491}{0,25} = 1,964.$$

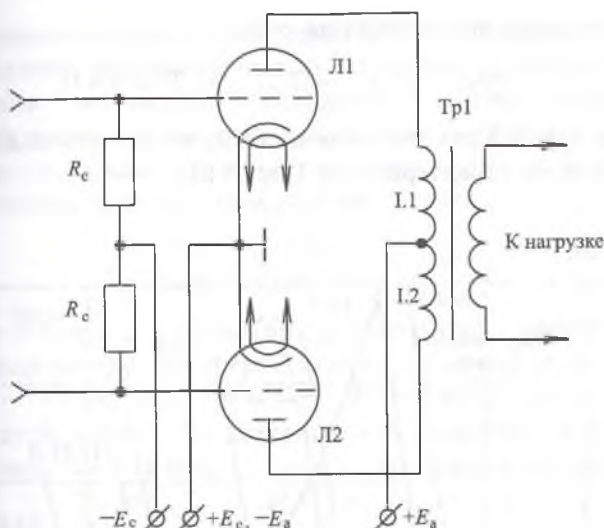


Рис. 3.20. Двухтактный оконечный каскад

Мощность рассеяния на аноде каждого триода

$$P_{a \max} = \frac{2 \cdot 6}{9 \cdot 0,8} \cdot (1 + 0,25)^2 = 2,604 \text{ Вт.}$$

2. Полезная мощность, отдаваемая каждым триодом,

$$P_1 = \frac{P_{\text{вых}}}{2m\eta_{\text{тр}}},$$

где m — число триодов в плече;

$$P_1 = \frac{6}{2 \cdot 1 \cdot 0,8} = 3,75 \text{ Вт.}$$

3. Анодное напряжение триода

$$U_{a0} = 2 \left(1 + \frac{\alpha_0}{\alpha} \right) \sqrt{\alpha R_i P_1} = 2(1 + 0,25) \sqrt{1,964 \cdot 840 \cdot 3,75} = 196,6 \text{ В.}$$

4 Напряжение источника сеточного смещения

$$E_c = -\frac{U_{a0}}{\mu} = -\frac{196,6}{4,15} = -47,37 \text{ В.}$$

5. Амплитуда переменного напряжения на сетке

$$U_{S\text{м}} = E_c \left(\frac{1 + \alpha}{\alpha_0 + \alpha} \right) = -47,37 \left(\frac{1 + 1,964}{0,491 + 1,964} \right) = -57,17 \text{ В.}$$

6. Мгновенное напряжение на сетке

$$U_M = U_{SM} + |E_c| = -57,17 + 47,37 = 9,8 \text{ В.}$$

7. Для дальнейших расчетов необходимо построить динамическую нагрузочную характеристику (рис. 3.21).

Ток анода, мА

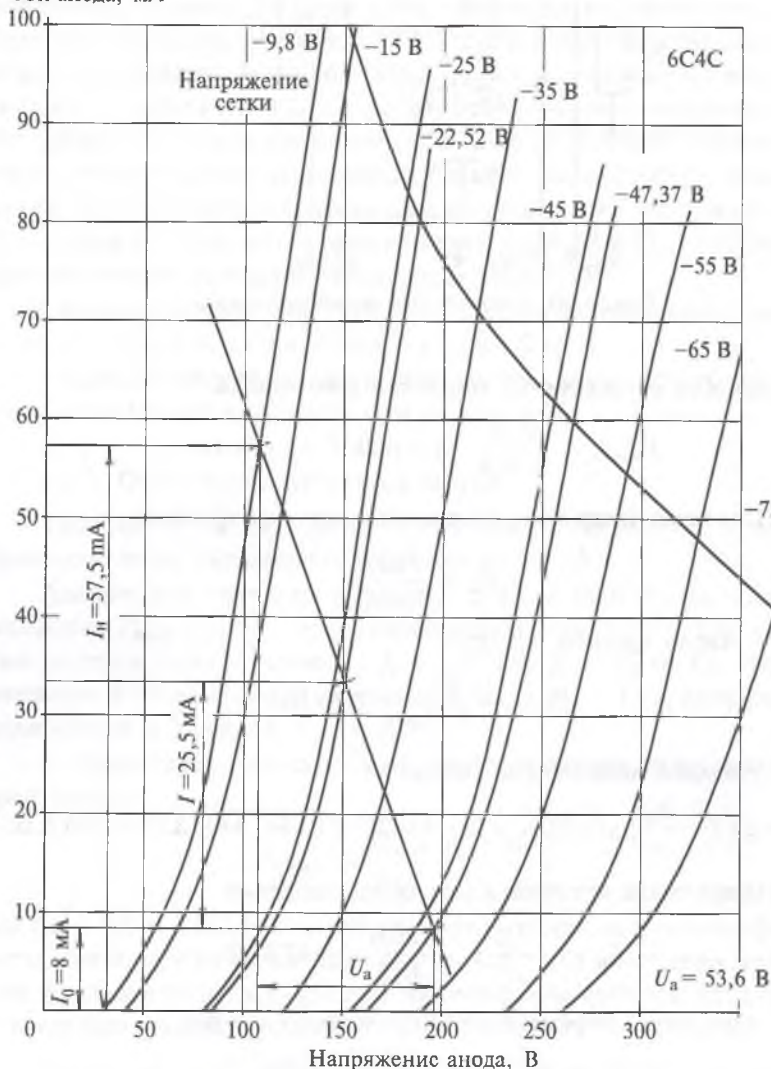


Рис. 3.21. Построение нагрузочной линии для 6С4С

На семействе анодных характеристик по оси анодных напряжений нужно отложить значение анодного напряжения, равного U_{a0} (точка 1). Из точки 1 восстановим перпендикуляр до пересечения с характеристикой триода при напряжении на сетке E_c (точка 2). Проекция точки 2 на ось анодных токов дает значение I_0 (точка 3). От точки 3 нужно отложить значение анодного тока (точка 4)

$$I' = \frac{U_{a0}}{\alpha R_i} = \frac{196,6}{1,964 \cdot 840} \approx 119 \text{ мА.}$$

Через точки 2 и 4 проводим прямую линию. Отрезок прямой, заключенный между характеристиками лампы при напряжениях на сетке $E_c = -47,37 \text{ В}$ и $U_m = -9,8 \text{ В}$, является динамической характеристикой лампы. По динамической характеристике определяем параметры ламп, необходимые для проведения дальнейших расчетов: $I_m = 57,5 \text{ мА}$, $I_1 = 25,5 \text{ мА}$, $I_0 = 8 \text{ мА}$, $U_a = 92,6 \text{ В}$, $I_{a0} = I_m/3 = 57,5/3 = 19,16 \text{ мА}$.

8. Проверим величину полезной мощности, отдаваемой каждым триодом:

$$P_1' = \frac{U_a I_m}{4000} = \frac{92,6 \cdot 57,5}{4000} = 1,331 \text{ Вт.}$$

9. Коэффициент нелинейных искажений

$$K_{\text{ни}} = 50 \sqrt{\left(\frac{\chi}{\chi+2}\right)^2 + \left(\frac{2I_1 - I_m}{I_1 + I_m}\right)^2} =$$

$$= 50 \sqrt{\left(\frac{0,1}{0,1+2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 25,5 - 57,5}{25,5 + 57,5}\right)^2} = 4,58 \%,$$

в этом выражении $\chi = 0,1$ — коэффициент асимметрии плеч.

10. Уточним значение мощности рассеяния на аноде каждого триода в режимах покоя (P_a') и максимальной мощности (P_a''):

$$P_a' = 196,6 \cdot 0,01916 = 3,249 \text{ Вт; } P_a'' = P_a' - P_1' = 3,249 - 1,331 = 1,918 \text{ Вт.}$$

11. Активное сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора

$$r_1 = \frac{\alpha R_i}{m} (1 - \eta_{\text{тр}}) = \frac{1,964 \cdot 840}{1} (1 - 0,8) = 330 \text{ Ом.}$$

12. Напряжение источника питания анодных цепей

$$E_a = U_{a0} + \frac{m I_{a0} r_1}{2000} = 196,9 + \frac{1 \cdot 19,16 \cdot 330}{2000} = 200 \text{ В.}$$

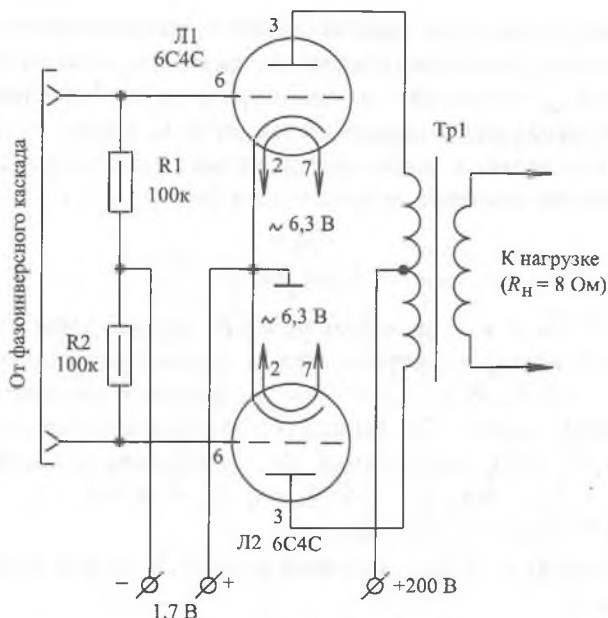


Рис. 3.22. Принципиальная схема оконечного каскада на триодах

13. Индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора

$$L_1 = \frac{4\alpha R_i}{2\pi f_n(1+\alpha)\sqrt{M_n^2-1}} = \frac{4 \cdot 1,964 \cdot 840}{628 \cdot (1+1,964)\sqrt{1,12^2-1}} = 7,03 \text{ Гн.}$$

14. Индуктивность рассеяния выходного трансформатора

$$L_S \leq \frac{4(1+\alpha)R_i\sqrt{M_n^2-1}}{2\pi m f_n} = \frac{4 \cdot (1+1,964) \cdot 840\sqrt{1,12^2-1}}{6,28 \cdot 1 \cdot 15000} = 0,0544 \text{ Гн.}$$

15. Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$n = \sqrt{\frac{mR_n}{4\alpha R_i}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 8}{4 \cdot 1,964 \cdot 840}} = 0,0348.$$

Принципиальная схема рассчитанного двухтактного каскада на триодах типа 6C4C представлена на рис. 3.22.

На рис. 3.23 представлен листинг первой подпрограммы расчета двухтактного оконечного каскада на триодах, в результате работы которой выводятся параметры: коэффициенты альфа0 и альфаA0 и A, мощность рассеяния на аноде РАМАХ в Вт, полезная мощность в нагрузке P1 в Вт, анодное напряжение UA0 в В, напряжение источника

```

begin
// получение данных из полей ввода
POUT := StrToFloat(Edit1.Text);
KU := StrToFloat(Edit2.Text);
M := StrToFloat(Edit3.Text);
RI := StrToFloat(Edit4.Text);
// вычисление параметров
A0 := 4/(4+KU); // коэффициент альфа0
A1 := A0/0.25; // коэффициент альфа1
PAMAX := (2*POUT)*(1+Sqr(A0/A1))/7.2; // мощность на аноде триода
P1 := POUT/(2*M*0.8); // полезная мощность от каждого триода
UA0 := 2*(1+A0/A1)*Sqrt(A1*RI*P1); // анодное напряжение в рабочей точ-
ке
ES := -(UA0/KU); // источник сеточного смещения
USM := ES*((1+A1)/(A0+A1)); // переменное напряжение на сетке
UM := USM+ES; // мгновенное сеточное напряжение
// вывод результатов расчетов
label5.Caption := 'альфа0' + FloatToStr(A0) + 'альфа1' + FloatToStr(A1) +
'мощность на аноде' + FloatToStr(PAMAX) + 'Вт' +
'полезная мощность' + FloatToStr(P1) + 'Вт' +
'анодное напряжение' + FloatToStr(UA0) + 'В' +
'ист сеточного смещ' + FloatToStr(ES) + 'В' +
'амплитуда на сетке' + FloatToStr(USM) + 'В' +
'мгнов значение' + FloatToStr(UM) + 'В';
end;

```

Рис. 3.23. Листинг первой подпрограммы расчета оконечного двухтактного каскада

сеточного смещения ES в В, амплитуда сеточного напряжения USM в В, мгновенное значение напряжения на сетке UM в В.

Скриншот первой подпрограммы расчета двухтактного оконечного каскада на триоде представлен на рис. 3.24.

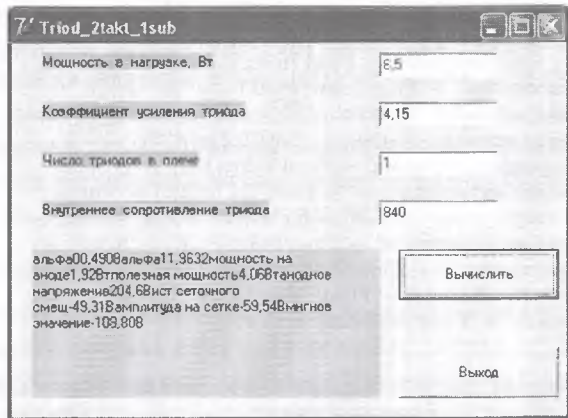


Рис. 3.24. Скриншот первой подпрограммы расчета двухтактного оконечного каскада

```

begin
// получение начальных данных из полей ввода
a := StrToInt(Edit1.Text);
b := StrToInt(Edit2.Text);
IA0 := StrToFloat(Edit3.Text);
UA0 := StrToFloat(Edit4.Text);
IMIN := StrToFloat(Edit5.Text);
IMAX := StrToFloat(Edit6.Text);
RA := StrToFloat(Edit7.Text);
USM := StrToFloat(Edit8.Text);
FN := StrToInt(Edit9.Text);
MN := StrToFloat(Edit10.Text);
FV := StrToInt(Edit11.Text);
MV := StrToFloat(Edit12.Text);
RI := StrToFloat(Edit13.Text);
RN := StrToFloat(Edit14.Text);
KU := StrToFloat(Edit15.Text);
AL := StrToInt(Edit16.Text);
KNI := 50*((a-b)/(a+b)); // коэффициент нелинейных искажений
PAT := IA0*UA0; // точное значение мощности рассеяния на аноде
I1 := (IMIN+IMAX)/2; // амплитуда анодного тока
POUT := (KPD*RA*Sqr(I1)); // полезная мощность в нагрузке
R1 := 0.1*AL*RI; // сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора
EA := UA0+USM+(IA0*R1); // напряжение источника анодного питания
RK := USM/IA0; // сопротивление цепи автосмещения
PRK := (USM*IA0); // мощность рассеяния резистора автосмещения
ECK := (KU*CHISL1)/(RI*FN*(1+AL)); // емкость конденсатора цепи автосмещения
RE := (RA*(RI+(2*R1)))/(RA+RI+(2*R1)); // эквивалентное сопротивление
L1 := RE/(2*pi*FN*Sqr(Sqr(MN)-1)); // индуктивность первичной обмотки
LS := (RI*(1+AL)*Sqr(MV*MV-1))/(2*pi*FV); // индуктивность рассеяния
NTR := Sqr(RN/(KPD*RA)); // коэффициент трансформации выходного трансформатора
// вывод результата
label17.Caption := 'нелинейные искажения' + FloatToStr(KNI) + '%' +
'мощность на аноде' + FloatToStr(PAT) + 'Вт' +
'амплитуда анодного тока' + FloatToStr(I1) + 'мА' +
'полезная мощность' + FloatToStr(POUT) + 'Вт' +
'первичная обмотка' + FloatToStr(R1) + 'Ом' +
'коэффициент трансформации' + FloatToStr(NTR) +
'источник анодного питания' + FloatToStr(EA) + 'В' +
'сопротивление автосмещения' + FloatToStr(RK) + 'Ом' +
'мощность сопр автосмещения' + FloatToStr(PRK) + 'Вт' +
'конденсатор автосмещения' + FloatToStr(ECK) + 'мкФ' +
'эквив сопротивление' + FloatToStr(RE) + 'Ом' +
'инд первичной обмотки' + FloatToStr(L1) + 'Гн' +
'инд рассеяния' + FloatToStr(LS) + 'Гн';
end;

```

Рис. 3.25. Листинг второй подпрограммы расчета оконечного двухтактного каскада

7' Вых 2такт триод 2SUB

Максимальный ток анода, А	0,057	Нижняя частота полосы усиления, Гц	60
Нулевое значение тока анода, А	0,008	Неравномерность АЧХ на нижней частоте	1,12
Ток анода в рабочей точке, А	0,019	Верхняя частота полосы усиления, Гц	14000
Напряжение анода в рабочей точке, В	195,8	Неравномерность АЧХ на верхней частоте	1,12
Ток анода I1, А	0,025	Число триодов в плече	1
Коэффициент альфа	3	Внутреннее сопротивление триода, Ом	840
Напряжение анода ЦА, В	92,6	Сопротивление нагрузки, Ом	8

полезная мощность 1,320 Вт нелинейные искажения 4,887% мощность в режиме покоя 3,720 Вт мощность в режиме полной мощности 2,401 Вт сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора 5940 Ом емкость анодного питания 200,68 нФ индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора 13,250 Гн индуктивность рассеяния 0,0771 Гн коэффициент трансформации 0,0282

Вычислить

Выход

Рис. 3.26. Скриншот второй подпрограммы расчета двухтактного оконечного каскада

На рис. 3.25 представлен листинг второй подпрограммы расчета двухтактного оконечного каскада на триодах, в результате работы которой выводятся параметры: коэффициент нелинейных искажений KNI, мощность рассеяния на аноде в Вт, амплитуда анодного тока I1 в А, полезная мощность в нагрузке POUT в Вт, сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора R1 в Ом, напряжение источника анодного питания EA в В, сопротивление резистора автоматического смещения RK в Ом и его мощность PRK в Вт, емкость конденсатора цепи автоматического смещения ECK в мкФ, эквивалентное сопротивление RE в Ом, индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора L1 в Гн, индуктивность рассеяния LS в Гн, коэффициент трансформации выходного трансформатора NTR.

Скриншот второй подпрограммы расчета двухтактного оконечного каскада на триоде представлен на рис. 3.26.

3.6. Фазоинверсные каскады

Фазоинверсный каскад усиления предназначен для создания из одного входного сигнала двух равных по амплитуде, но сдвинутых по фазе на π (180°) выходных сигнала. Фазоинверсный каскад обычно служит для раскачки выходного двухтактного усилителя мощности. В практике построения ламповых УЗЧ обычно применяют две основ-

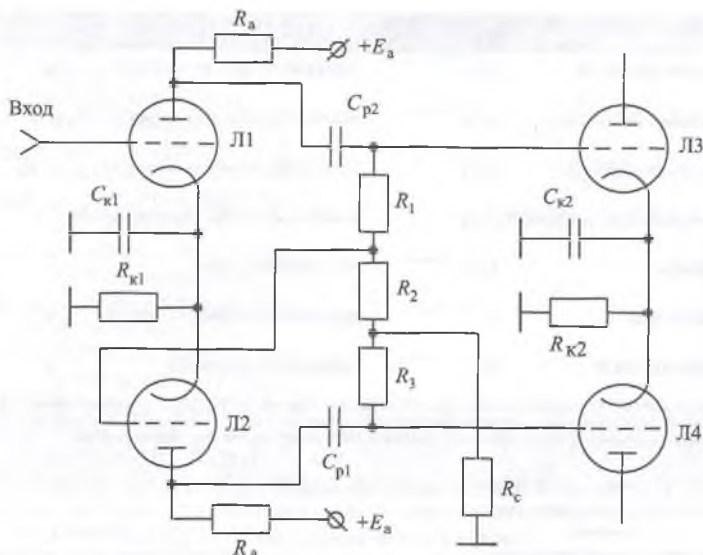


Рис. 3.27. Самобалансирующий фазоинверсный каскад

ные схемы фазоинверсных каскадов. На рис. 3.27 представлена схема самобалансирующегося фазоинверсного каскада.

Расчет элементов самобалансирующегося фазоинверсного каскада можно осуществить в следующей последовательности.

1. Значение сопротивления анодной нагрузки

$$R_a = (2 \dots 5) R_i. \quad (3.15)$$

2. Сопротивление анодной нагрузки переменному току

$$R_a^{\approx} = \frac{R_a R_3}{R_a + R_3}, \quad (3.16)$$

где сопротивление $R_3 = R_1 + R_2$, сопротивление R_3 не должно превышать предельного сопротивления в цепи первой сетки для выбранной лампы оконечного каскада. При этом сопротивление сеточного смещения

$$R_c = 0,2 R_3. \quad (3.17)$$

3. Коэффициент усиления фазоинверсного каскада

$$K_0 = \frac{\mu R_a^{\approx}}{R_i + R_a^{\approx}}, \quad (3.18)$$

где μ — коэффициент усиления примененного триода.

4. Значения сопротивлений R_2 и R_1 соответственно равны:

$$R_2 = \frac{R_3}{K_0}, \quad R_1 = R_3 - R_2. \quad (3.19)$$

5. Сопротивление резистора автоматического смещения R_k рассчитывается по формуле

$$R_k = \frac{U_{c0}}{2I_{a0}}, \quad (3.20)$$

где знаменатель $2I_{a0}$ учитывает протекание по резистору суммы токов двух триодов.

6. Расчет емкости разделительного конденсатора производят по формуле

$$C_p = \frac{10^6}{2\pi f_n R_3 \sqrt{M_n^2 - 1}}. \quad (3.21)$$

Для примера рассчитаем номиналы элементов самобалансирующего фазоинверсного каскада выполненного на двойном триоде типа 6НЗП, у которого $\mu = 36$, $R_i = 6,1$ кОм, нижняя частота полосы усиления $f_n = 60$ Гц, коэффициент частотных искажений на нижней границе полосы усиливаемых частот примем равным $M_n = 1,12$, напряжение сеточного смещения $U_{c0} = -2$ В. Фазоинверсный каскад нагружен на оконечный, выполненный на лампах типа 6П14П. Для лампы типа 6П14П максимально допустимое сопротивление утечки первой сетки равно 1 МОм. Каскад питается от источника $E_a = +230$ В.

Расчет самобалансирующего фазоинверсного каскада.

1. Сопротивление анодной нагрузки

$$R_a = (2...5)R_i = 4 \cdot 6,1 = 24,4 \text{ кОм}.$$

2. Величины сопротивлений R_3 и R_c соответственно равны:

$$R_3 = R_1 + R_2 = 560 \text{ кОм}; \quad R_c = R_4 = 0,2R_3 = 0,2 \cdot 560 = 112 \text{ кОм}.$$

3. Сопротивление анодной нагрузки переменному току равно

$$R_a^{\approx} = \frac{R_a R_3}{R_a + R_3} = \frac{24,4 \cdot 560}{24,4 + 560} = 23,38 \text{ кОм}.$$

4. Коэффициент усиления каскада

$$K_0 = \frac{\mu R_a^{\approx}}{R_i + R_a^{\approx}} = \frac{36 \cdot 23,38}{6,1 + 23,38} = 28,55.$$

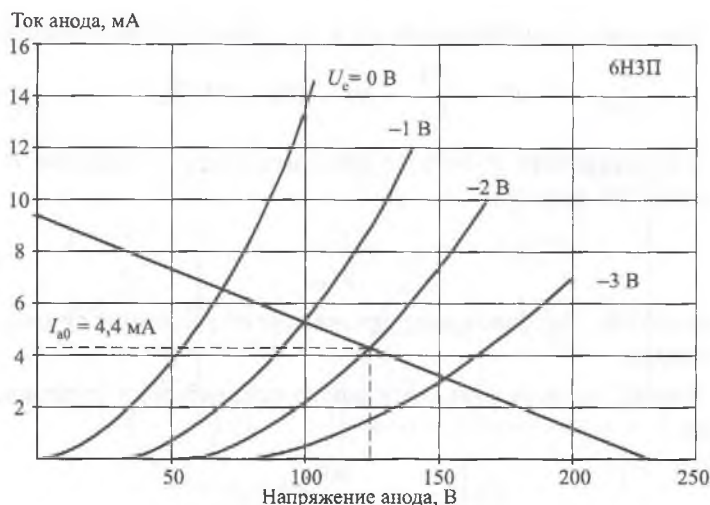


Рис. 3.28. Построение нагрузочной линии для 6НЗП

5. Значения сопротивлений R_2 и R_1 соответственно равны:

$$R_2 = \frac{R_3}{K_0} = \frac{560}{28,55} = 19,62 \text{ кОм};$$

$$R_1 = R_3 - R_2 = 560 - 19,62 = 540,38 \text{ кОм}.$$

На семействе анодных характеристик лампы 6НЗП строим нагрузочную прямую (рис. 3.28).

При $E_a = +230 \text{ В}$ и $R_a = 24,4 \text{ кОм}$ значение анодного тока $I_{a0} = 4,4 \text{ мА}$, следовательно, сопротивление резистора автоматического смещения

$$R_k = \frac{U_{c0}}{2I_{a0}} = \frac{|-2|}{2 \cdot 4,4} = 227 \text{ Ом}.$$

7. Емкость разделительных конденсаторов

$$C_{p1} = C_{p2} = \frac{10^6}{2\pi f_n R_3 \sqrt{M_n^2 - 1}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 560 \sqrt{1,12^2 - 1}} = 9396 \text{ пФ}.$$

Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} удобно взять на номинальную емкость 0,01 мкФ с максимальным рабочим напряжением 400 В, например типа К40П-26.

8. Емкость конденсатора в цепи автосмещения

$$C_k \geq \frac{2000}{2\pi f_n R_n (\text{кОм})} = \frac{2000}{2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 0,227} = 23,38 \text{ мкФ}.$$

Из стандартного ряда подходит значение емкости 33 мкФ.

Для удобства практической реализации каскада полезно перечислить результаты расчета, причем наряду с рассчитанными номиналами радиоэлементов указать их ближайшие стандартные значения (в скобках):

Сопротивление в цепи первой сетки (предельное, по справочнику), кОм	1000 (300,0)
Сопротивление анодной нагрузки, кОм	24,4 (24,0)
Сопротивление R3, кОм	560 (560,0)
Сопротивление в цепи первой сетки оконечного каскада R4, кОм	112 (110,0)
Сопротивление R2, кОм	19,62 (20,0)
Сопротивление R1, кОм	540,38 (510,0 + 30,0)
Сопротивление автоматического смещения, Ом	227 (220,0)
Емкость разделительного конденсатора, нФ	9,396 (10,000)
Емкость конденсатора в цепи автосмещения, мкФ	23,38 (33)

Принципиальная схема самобалансирующегося фазоинверсного каскада с рассчитанными номиналами радиоэлементов представлена на рис. 3.29.

На рис. 3.30 представлена схема другого фазоинверсного каскада, называемого каскадом с разделенной нагрузкой, который в отличие от самобалансирующегося каскада не дает большого усиления ($K_0 < 1$), но обладает лучшими частотными характеристиками.

Расчет элементов фазоинверсного каскада с разделенной нагрузкой (см. рис. 3.30) можно осуществить в следующей последовательности.

1. Как и в первом случае, сначала необходимо вычислить сопротивление анодной нагрузки:

$$R_a = (2...5)R_i.$$

2. Сопротивление

$$R'_a = \frac{R_a}{2}. \quad (3.22)$$

Сопротивления сеточного смещения выбирают в соответствии с паспортными данными применяемых ламп при условии, что $R_{c2} = R_{c3}$.

3. Сопротивление анодной нагрузки переменному току

$$R_a^{\approx} = \frac{R'_a R_{c2}}{R'_a + R_{c2}}. \quad (3.23)$$

Возникающая в схеме отрицательная обратная связь приводит к изменению внутреннего сопротивления лампы, при этом оно стано-

вится равным

$$R'_i = \frac{R_i + R_a^{\approx}}{\mu}. \quad (3.24)$$

4. Катодная часть нагрузки шунтируется конденсатором, значение которого вычисляется следующим образом:

$$C_{\text{кат}} = C_K + C_M + C_{\text{вх.дин}}, \quad (3.25)$$

где C_K — емкость лампы на участке катод — подогреватель, C_M — емкость монтажа (для расчетов обычно выбирают значение 20...25 пФ), $C_{\text{вх.дин}}$ — динамическая входная емкость лампы оконечного каскада. Для устранения нелинейности частотной характеристики на высоких частотах в анодную цепь включают выравнивающий конденсатор C_B . Емкость конденсатора C_B обычно равна или несколько отличается от емкости $C_{\text{кат}}$.

5. После построения динамической нагрузочной характеристики определяют значение I_{a0} и находят величину резистора R_K .

Для примера рассчитаем номиналы элементов фазоинверсного каскада с разделенной нагрузкой, выполненного на двойном триоде типа 6Н2П, у которого $\mu = 97$, $R_i = 46,3$ кОм, нижняя частота полосы усиления $f_H = 60$ Гц, коэффициент частотных искажений на нижней границе полосы усиливаемых частот примем равным $M_H = 1,12$, напряжение сеточного смещения $U_{c0} = -1$ В. Фазоинверсный каскад нагружен на оконечный, выполненный на лампах типа 6П14П. Для этой лампы максимально допустимое сопротивление утечки первой сетки равно 1 МОм. Каскад питается от источника $E_a = +260$ В.

Расчет фазоинверсного каскада с разделенной нагрузкой.

1. Сопротивление анодной нагрузки

$$R_a = (2...5)R_i = 3 \cdot 46,3 = 138,9 \text{ кОм.}$$

2. Сопротивления R'_a в анодной и катодной цепях

$$R'_a = \frac{R_a}{2} = \frac{138,9}{2} = 69,45 \text{ кОм.}$$

3. Сопротивление анодной нагрузки переменному току

$$R_a^{\approx} = \frac{R'_a R_{c2}}{R'_a + R_{c2}} = \frac{69,45 \cdot 270}{69,45 + 270} = 55,24 \text{ кОм.}$$

4. Внутреннее сопротивление лампы

$$R'_i = \frac{R_i + R_a^{\approx}}{\mu} = \frac{46,3 + 55,24}{97} = 1,04 \text{ кОм.}$$

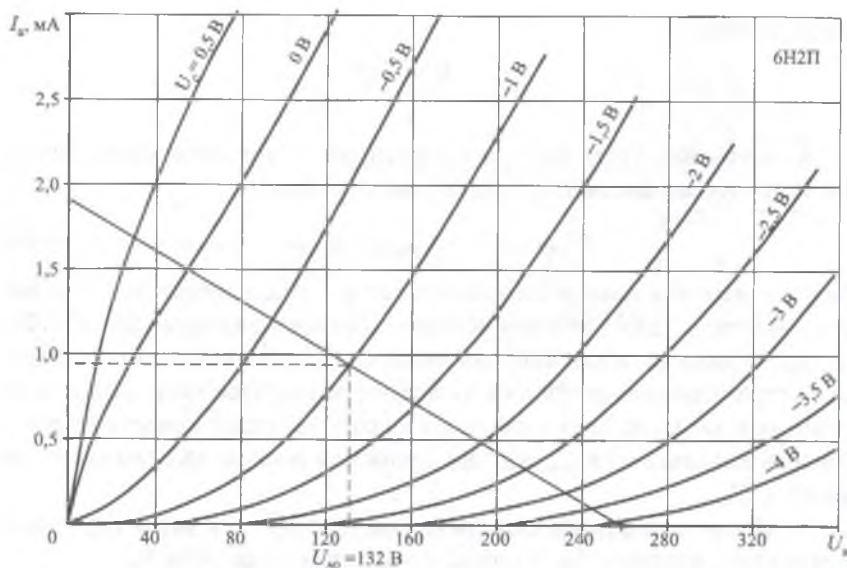


Рис. 3.31. Построение нагрузочной линии для 6Н2П

5. Емкость катодного конденсатора

$$C_{\text{кат}} = C_K + C_M + C_{\text{вх.дин}} = 5 + 20 + 11 = 36 \text{ пФ.}$$

Емкость выравнивающего конденсатора C_B выберем номиналом 36 пФ.

На семействе анодных характеристик 6Н2П строим нагрузочную прямую (рис. 3.31).

При $E_a = +260 \text{ В}$ и $R_a = 138,9 \text{ кОм}$ значение анодного тока $I_{a0} = 0,92 \text{ мА}$, следовательно, сопротивление резистора автоматического смещения

$$R_K = \frac{U_{c0}}{I_{a0}} = \frac{|-1|}{0,92} = 1087 \text{ Ом.}$$

7. Емкости разделительных конденсаторов

$$C_{p1} = C_{p2} = \frac{10^6}{2\pi f_n R_c \sqrt{M_H^2 - 1}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 270 \sqrt{1,12^2 - 1}} = 19487 \text{ пФ.}$$

Как и в первом случае, ниже приведены рассчитанные номиналы радиоэлементов фазоинверсного каскада с разделенной нагрузкой (в скобках указаны стандартные значения).

Сопротивление в цепи первой сетки предельное, по справочнику,
кОм 500 (300)

4 ЭКРАНИРОВАННЫЕ ЛАМПЫ

4.1. Устройство и принцип действия тетрода

Электронные лампы, предназначенные для работы в усилительных каскадах, должны соответствовать следующим требованиям:

- обладать возможно большим коэффициентом усиления μ ;
- обладать возможно большим значением крутизны S ;
- значения междуэлектродных емкостей должны быть минимальны, особенно на участке управляющая сетка — анод. Большая емкость на этом участке может создать общую для сетки и анодной нагрузки цепь переменного тока, что приводит к появлению самовозбуждения усилительного каскада.

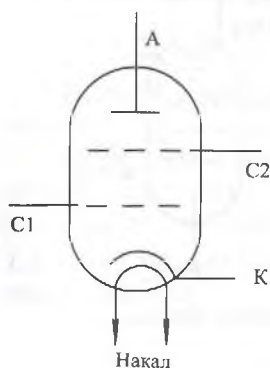


Рис. 4.1. Схемное изображение тетрода

Триод не может соответствовать всем перечисленным требованиям. Так, например, большие величины μ и S несовместимы с левым расположением характеристики и низким анодным напряжением. Для увеличения указанных параметров управляющую сетку необходимо делать очень густой и располагать как можно ближе к катоду, однако при этом уменьшится напряжение отсечки и характеристика сместится вправо. Для сдвига характеристики влево в этом случае необходимо увеличивать напряжение на аноде.

Для устранения недостатков, присущих триоду, в пространство между анодом и управляющей сеткой введена вторая сетка, которая называется экранирующей. Лампа с двумя сетками называется тетродом (рис. 4.1).

На экранирующую сетку замыкается часть силовых линий электрического поля анода, вследствие чего на катод замыкается их еще меньше, чем в триоде.

Величина потока эмитированных катодом электронов в тетроде определяется суммарным действием потенциалов управляющей и эк-

ранирующей сеток, а также потенциалом анода. Действующее напряжение тетрода

$$U_d = U_{c1} + D_1 U_{c2} + D_1 D_2 U_a, \quad (4.1)$$

где D_1 — проницаемость управляющей сетки; D_2 — проницаемость экранирующей сетки. Результирующая проницаемость тетрода

$$D' = D_1 D_2 \ll 1,$$

так как $D_1 < 1$ и $D_2 < 1$.

Рабочий потенциал экранирующей сетки выбирается из условия

$$U_3 = (0,5 \dots 1) U_a,$$

необходимого для эффективного влияния на пространственный заряд вблизи катода.

4.2. Закон трех вторых для тетрода

Уравнение распределения тока в тетроде записывается в следующем виде:

$$I_k = I_a + I_3 = k U_d^{3/2} = k (U_c + D_1 U_3 + D' U_a)^{3/2}. \quad (4.2)$$

Напряжение отсечки для тетрода

$$U_c = -(D_1 U_3 + D' U_a), \quad (4.3)$$

следовательно, запирающий потенциал сильно зависит от напряжения на экранирующей сетке и проницаемости управляющей сетки, вклад второго слагаемого согласно (4.3) минимален. В тетродах напряжение отсечки получается довольно высоким, что позволяет получать неискаженное усиление входного сигнала при большом значении коэффициента усиления μ и невысоком напряжении на аноде лампы U_a .

4.3. Статические характеристики тетрода

Анодно-сеточные характеристики тетрода выражают зависимость тока анода I_a и тока второй сетки I_{c2} от напряжения на первой сетке (U_{c1}) при $(U_a, I_{c2}) = \text{const}$ (рис. 4.2).

Характеристики анодного и сеточного токов при $U_a = 180$ В ($U_a = 210$ В) и $U_{c2} = 90$ В расположены близко одна от другой, что обусловлено слабым влиянием потенциала анода на ток в лампе. При этом незначительное увеличение потенциала второй сетки $\Delta U_{c2} = 130 - 90 = 40$ В, вызывает значительное увеличение анодного тока, что указывает на преобладающее значение напряжения второй

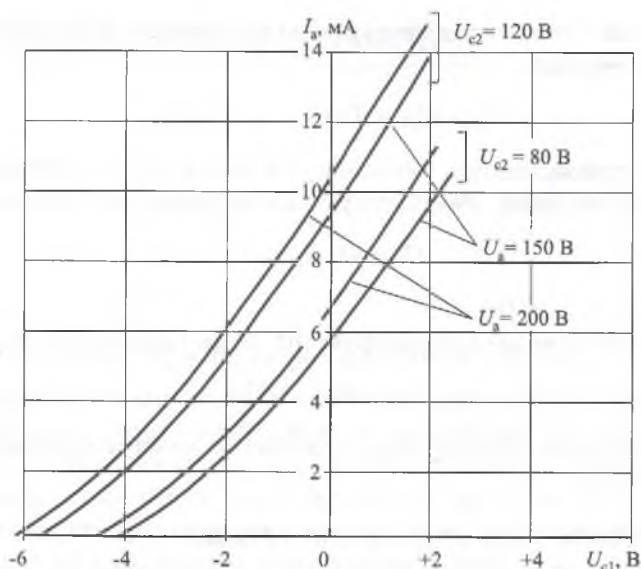


Рис. 4.2. Анодно-сеточные характеристики тетрода

сетки на ток в лампе. Ток второй сетки в тетроде достигает значения $I_{c2} = (0,2 \dots 0,4) I_a$.

Анодные характеристики тетрода выражают зависимость тока анода I_a от анодного напряжения при $(U_{c1}, U_{c2}) = \text{const}$ (рис. 4.3).

Характеристики анодного тока совмещены с характеристиками тока второй сетки. При начальных условиях ($U_a = 0, U_{c2} \geq 0$) анод-

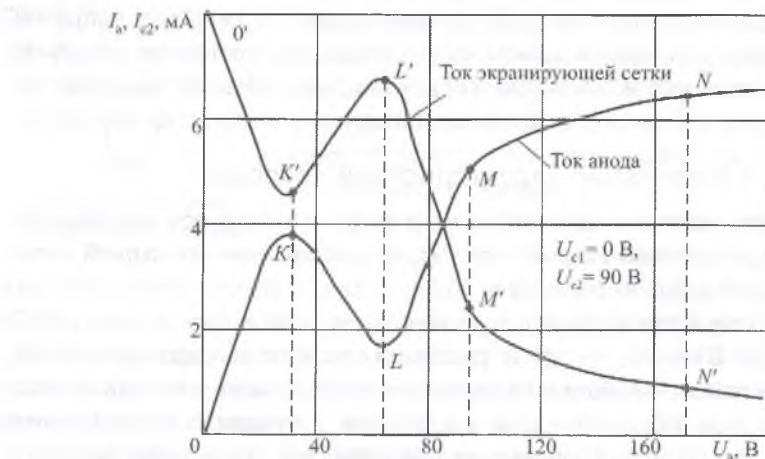


Рис. 4.3. Анодные характеристики тетрода

ный ток $I_a = 0$ и электроны летят к экранирующей сетке. Ток экранирующей сетки в этом режиме равен максимальному значению (точка O' на характеристике). При повышении анодного напряжения до $U_a = 30...40$ В происходит увеличение тока анода (участок OK) и уменьшение тока второй сетки (участок $O'K'$). В этом случае $U_a \ll U_{c2}$ и в лампе устанавливается режим, при котором часть электронов возвращается от анода к экранирующей сетке. В лампе устанавливается режим *возврата*. При увеличении анодного напряжения до $U_a = 60...70$ В в тетроде возникает вредное явление под названием *динатронный эффект*. Он проявляется в возникновении вторичной электронной эмиссии электронов с анода с последующим уходом их к экранирующей сетке, так как она находится под большим (по сравнению с анодом) положительным потенциалом. При этом анодный ток уменьшается (участок KL), а ток экранирующей сетки возрастает (участок $K'L'$). При увеличении анодного напряжения $U_a > 70$ В так, чтобы оно приближалось к напряжению на экранирующей сетке, будет возрастать поле анода, под действием которого выбиваемые с анода электроны будут возвращаться обратно на анод. При этом происходит увеличение анодного тока (участок LM) и уменьшение тока второй сетки (участок $L'M'$). При дальнейшем увеличении напряжения на аноде, так что $U_a > U_{c2}$, происходит незначительное увеличение тока анода (участок MN) и уменьшение тока экранирующей сетки (участок $M'N'$). В лампе устанавливается режим *перехвата*.

Вредное действие динатронного эффекта проявляется в искажении формы анодного тока, повышении шумов лампы, снижению чувствительности при усилении слабых сигналов. В маломощных тетродах динатронный эффект устраняют путем создания потенциального барьера получаемого увеличением расстояния между анодом и экранирующей сеткой. При этом ослабляется влияние поля анода на потенциал между экранирующей сеткой и анодом, а влияние пространственного заряда между анодом и экранирующей сеткой увеличивается. При таком конструктивном исполнении электродов в пространстве около анода возникает потенциальный минимум (рис. 4.4), образующий потенциальный барьер ($U_{ПБ}$), препятствующий динатронному эффекту. На рис. 4.4 $r_{к-а}$ — расстояние между катодом и анодом; $r_{с2-а}$ — расстояние между второй сетки и анодом.

В мощных лампах, которые называют *лучевыми тетрами*, потенциальный барьер создается за счет увеличения объемной плотности заряда. Это достигается фокусировкой электронного потока в горизонтальной и вертикальной плоскостях в электронные лучи (рис. 4.5).

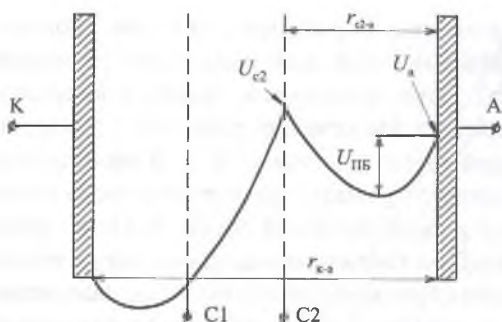


Рис. 4.4. Распределение потенциала в тетроде

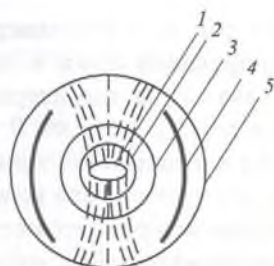


Рис. 4.5. Форма электронного потока в лучевом тетроде

Фокусировка в горизонтальной плоскости осуществляется посредством поля управляющей сетки 2, на которую подается отрицательное напряжение смещения. Такая фокусировка облегчается тем, что технологически управляющая и экранирующая 3 сетки выполняются с одинаковым шагом навивки. Фокусировка электронного потока в вертикальной плоскости достигается применением вспомогательных элементов — пластин 4, конструктивно соединенных с катодом 1 и имеющих относительно него нулевой потенциал. В результате двойной фокусировки электронный поток собирается в узкие пучки, которые характеризуются большой объемной плотностью зарядов. Эти пучки формируют в пространстве около анода 5 отрицательный пространственный заряд большой плотности. Дополнительного увеличения минимума потенциала можно добиться, увеличивая расстояние между экранирующей сеткой и анодом. Это приведет к снижению влияния заряда вблизи анода на потенциал этого заряда. Вследствие этого, потенциальный барьер будет препятствовать попаданию электронов вторичной эмиссии с анода на экранирующую сетку.

Анодные характеристики лучевого тетрода (рис. 4.6) не имеют характерного для обычных тетродов провала.

Работа лампы в области пологих областей анодной характеристики позволяет увеличить уровень сигнала в анодной цепи, что приводит к увеличению КПД тетрода. По сравнению с обычными тетродами у лучевых тетродов за счет улучшенного токораспределения в лампе ток экранирующей сетки меньше в 4 раза и равен $I_{c2} = (0,05...0,1)I_a$. Отрицательной особенностью лучевых тетродов является большая проходная емкость, что ограничивает частотный диапазон применения. Это вызвано одинаковым шагом намотки управляющей и экранирующей сеток. Мощные лучевые тетроды применяют в основном в качестве регулирующей лампы в схемах электронных стабилизаторов напряжения и оконечных каскадов УЗЧ.

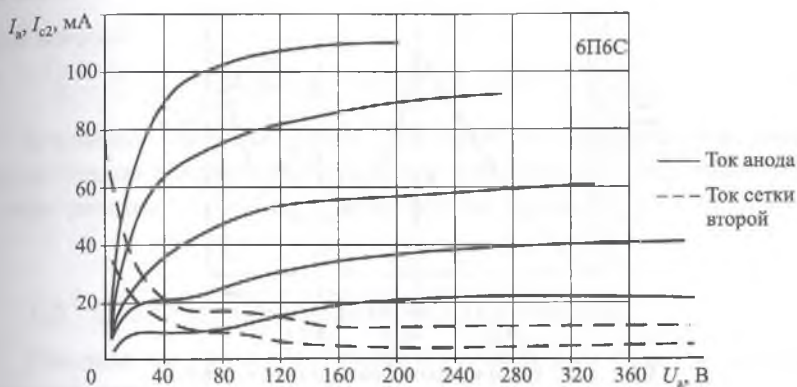


Рис. 4.6. Анодные характеристики лучевого тетрода

4.4. Устройство и принцип действия пентода

Для устранения динаatronного эффекта в пространство между экранирующей сеткой и анодом вводят третью сетку, которую называют антидинаatronной или защитной (рис. 4.7).

Защитная сетка обычно имеет нулевой потенциал и в подавляющем большинстве электронных ламп соединяется с катодом внутри баллона (рис. 4.8).

Защитная сетка изменяет в пентоде распределение потенциала в пространстве между анодом и экранирующей сеткой (рис. 4.9). Отрезок r_{c3-a} — расстояние между защитной сеткой и анодом.

График показывает, что в плоскости витков защитной сетки C_3 потенциал электрического поля ниже потенциала анода. За счет этого на участке между экранирующей сеткой C_2 и анодом возникает потен-

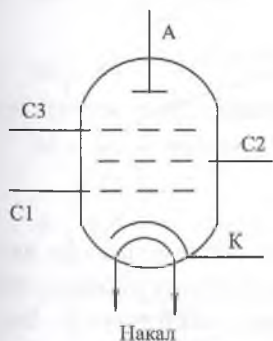


Рис. 4.7. Схемное изображение пентода

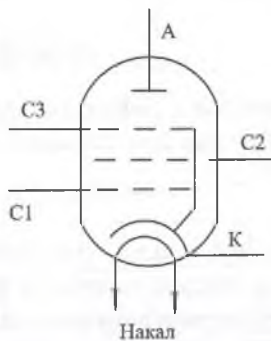


Рис. 4.8. Подключение защитной сетки в пентоде

трех вторых:

$$I_k = I_{c1} + I_{c2} + I_{c3} + I_a = k \sqrt[3]{U_d} \approx k \sqrt[3]{(U_{c1} + D_1 U_{c2})}. \quad (4.7)$$

В режиме усиления пентод работает при отрицательном смещении на управляющей сетке и нулевом потенциале на защитной сетке. В этом режиме $(I_{c1}, I_{c3}) \approx 0$, поэтому ток катода

$$I_k = I_{c2} + I_a. \quad (4.8)$$

4.5. Статические характеристики пентода

Пентоды оценивают по семействам анодно-сеточных и анодных характеристик.

Анодно-сеточные характеристики являются функциями токов анода и экранной сетки от потенциала на управляющей сетке:

$$\{I_a, I_{c2}\} = f(U_{c1}) \quad \text{при} \quad U_a, U_{c2}, U_{c3} = \text{const}.$$

Анодно-сеточные характеристики пентода аналогичны по виду и физическому смыслу характеристикам тетрода.

Анодные характеристики пентода являются функцией тока анода от напряжения на аноде $I_a = f(U_a)$ при условии $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} = \text{const}$ (рис. 4.10). Как видно из графика, на характеристиках отсутствуют динаatronные провалы.

При начальном напряжении на аноде $U_a \geq 0$ В в лампе может протекать ток I_0 , создаваемый небольшим количеством электронов,

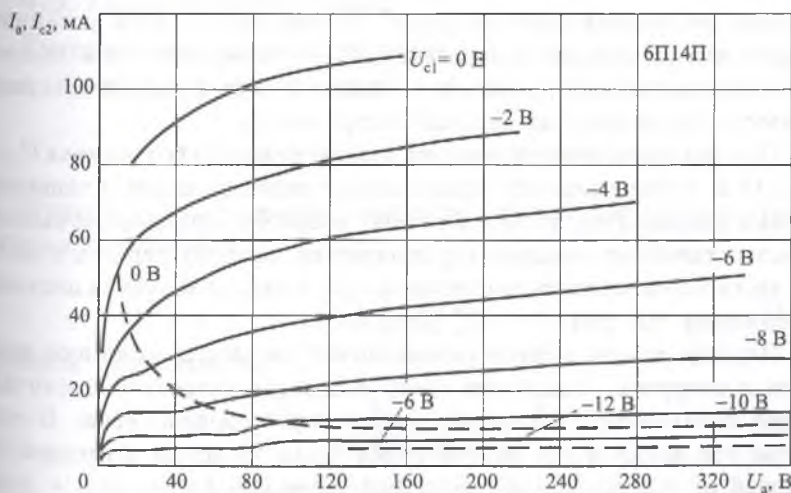


Рис. 4.10. Анодные характеристики пентода

обладающих очень высокой начальной скоростью. Подавляющее большинство электронов в этом режиме оседает на экранирующей сетке напрямую или возвращаясь из пространства между экранирующей и защитной сетками. Таким образом, при небольших значениях анодного напряжения пентод работает в режиме возврата части электронов. При увеличении анодного напряжения $U_a > U_{c2}$ прекращается возврат электронов к экранирующей сетке. Пентод переходит в область рабочих режимов (пологий участок характеристик). На этом участке анодных напряжений пентод работает в режиме прямого перехвата некоторой части электронов экранирующей сеткой. Увеличение анодного тока при этом происходит в основном за счет числа электронов, которые притягивает поле анода из объемного заряда, расположенного около катода. Пологость анодных характеристик при больших значениях анодного напряжения объясняется слабым влиянием поля анода на анодный ток. Пологость анодных характеристик не тождественна режиму насыщения, при котором наступает отсечка анодного тока. На семействе анодных характеристик (см. рис. 4.10) можно видеть, что при больших отрицательных напряжениях на управляющей сетке характеристики идут более полого и на меньшем расстоянии друг от друга. Уменьшение расстояния между характеристиками объясняется уменьшением крутизны анодно-сеточных характеристик. Для получения неискаженного усиленного сигнала изменения крутизны должны происходить пропорционально изменению потенциала на управляющей сетке. При этом при одинаковом изменении сеточного смещения анодные характеристики будут располагаться на одинаковом расстоянии друг от друга. В том случае, если увеличить напряжение на экранирующей сетке (U_{c2}), увеличится ток в лампе и характеристики будут расположены выше. Режим возврата сместится в область более высоких анодных напряжений.

При подаче на защитную сетку положительного потенциала $U_{c3} = 5 \dots 10$ В потенциальный барьер между экранирующей и защитной сетками уменьшится, а следовательно, возрастет крутизна начальной области семейства анодных характеристик, поэтому переход к пологой части характеристик достигается при меньшем значении анодного напряжения, т.е. при $U'_a < U''_a$ (рис. 4.11).

Перевод лампы в такой режим может увеличить полезную мощность в нагрузке. Защитную сетку в пентоде в некоторых случаях можно использовать в качестве второй управляющей сетки. В этом случае ток анода и ток второй сетки будут являться функцией зависящей от потенциала на защитной сетке при $U_a, U_{c2}, U_{c1} = \text{const}$ (рис. 4.12).

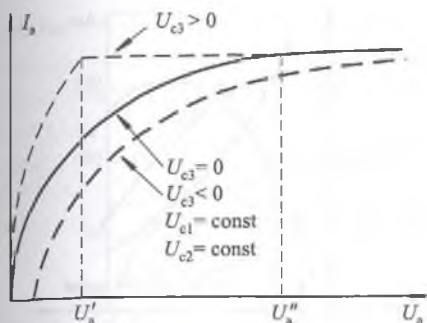


Рис. 4.11. Зависимость анодной характеристики пентода от потенциала на защитной сетке

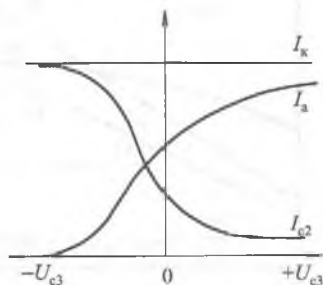


Рис. 4.12. Зависимость токов анода и экранирующей сетки от потенциала на защитной сетке

При отрицательном значении потенциала на экранирующей сетке распределение тока в лампе происходит между ней и анодом. При некотором отрицательном напряжении на экранирующей сетке лампа переходит в режим отсечки $I_a = 0$, а ток защитной сетки становится равен току катода: $I_{c2} = I_K$. В области положительных значений напряжений на экранирующей сетке возврат электронов на защитную сетку прекращается, поэтому токи анода и защитной сетки остаются неизменными. Ток катода также практически не меняется, вследствие ослабления влияния потенциала защитной сетки, из-за проявления экранирующих свойств управляющей и экранирующей сеток.

4.6. Параметры пентодов

Статические параметры пентодов.

1. Крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{c1}} \quad \text{при } U_a, U_{c2}, U_{c3} = \text{const}. \quad (4.9)$$

Учитывая, что в режиме перехвата анодный ток связан с током катода соотношением

$$I_a = \frac{k_T}{1 + k_T} I_K, \quad (4.10)$$

крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{c1}} = \frac{k_T}{1 + k_T} \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{c1}} = \frac{k_T S_K}{1 + k_T}, \quad (4.11)$$

где S_K — крутизна характеристики по катодному току; $k_T = I_a / I_{c2}$ — коэффициент токораспределения.

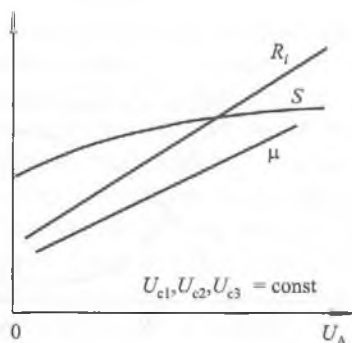


Рис. 4.13. Зависимость параметров пентода от анодного напряжения

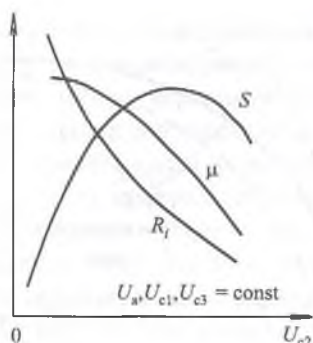


Рис. 4.14. Зависимость параметров пентода от потенциала на экранирующей сетке

Из последнего выражения очевидно, что крутизна характеристики пентода является функцией коэффициента токораспределения k_T . В рабочей области характеристик крутизна практически не зависит от величины потенциала анода (рис. 4.13), в области малых значений потенциала анода (режим возврата) крутизна уменьшается за счет снижения коэффициента k_T .

Соответственно увеличение напряжения на управляющей сетке вызывает повышение анодного тока и крутизны характеристики. Повышение потенциала на экранирующей сетке приводит к увеличению крутизны (см. рис. 4.12). При условии $U_{c2} > U_a$ в пентоде возникает режим возврата электронов, характеризующийся снижением коэффициента k_T . Это приводит в конечном итоге к остановке роста крутизны.

2. Внутреннее сопротивление — отношение

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad \text{при} \quad U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} = \text{const}. \quad (4.12)$$

Рабочий режим пентода характеризуется слабой зависимостью тока анода от потенциала на аноде, коэффициент k_T также меняется незначительно, следовательно, внутреннее сопротивление пентода линейно возрастает с увеличением анодного потенциала. В области рабочих режимов пентода рост потенциала на экранирующей сетке приводит к росту анодного тока и соответственно к уменьшению внутреннего сопротивления (рис. 4.14).

Такая же зависимость изменения внутреннего сопротивления наблюдается при увеличении потенциала на управляющей сетке при условии, что $U_{c2}, U_a = \text{const}$.

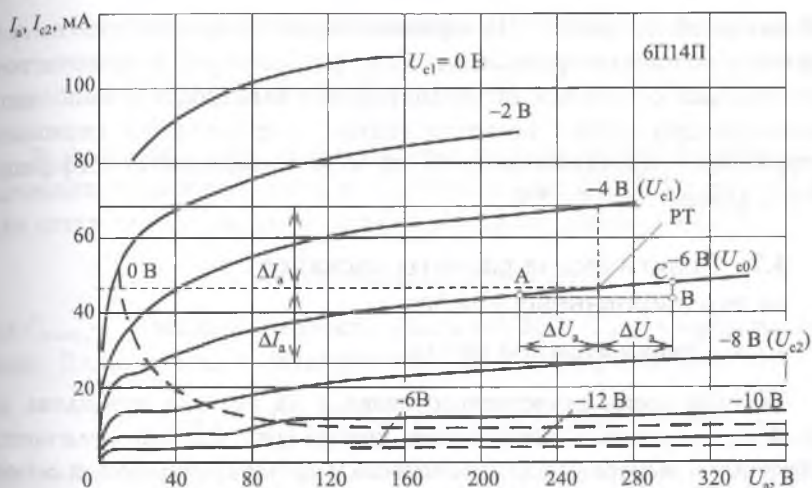


Рис. 4.15. Определение параметров экранированных ламп

3. Коэффициент усиления

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_{c1}} = SR_i \quad \text{при} \quad I_a, U_{c2}, U_{c3} = \text{const}. \quad (4.13)$$

Статические параметры тетродов и пентодов в заданной точке удобно определять по семейству анодных характеристик (рис. 4.15).

При определении значения крутизны в рабочей точке А удобно взять удвоенные приращения анодного тока и напряжения на управляющей сетке:

$$S = \frac{I_{a1} - I_{a2}}{U'_{c1} - U''_{c1}} = \frac{2\Delta I_a}{2\Delta U_{c1}} \quad \text{при} \quad U_{a0} = \text{const}. \quad (4.14)$$

Внутреннее сопротивление находят из треугольника АВС:

$$R_i = \frac{2\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{AB}{BC} \quad \text{при} \quad U_c = \text{const}. \quad (4.15)$$

Коэффициент усиления μ легко определить по рассчитанным значениям S и R_i :

$$\mu = SR_i. \quad (4.16)$$

Пентоды, предназначенные для работы в низкочастотных радиотехнических устройствах, с успехом применяются в различных каскадах УЗЧ. Например, применение пентодов в выходных каскадах более предпочтительно, чем применение триодов, так как в этом случае необходимо меньшее напряжение возбуждения для получения одинако-

вой выходной мощности. На звуковых частотах практически не сказываются междуэлектродные емкости, что позволило в низкочастотных пентодах отказаться от экранирования электродов и выполнить экранирующую сетку с большим шагом. Это привело к снижению внутреннего сопротивления до 30...60 кОм и увеличению коэффициента усиления до 200...300.

4.7. Практические расчеты каскадов на экранированных лампах

4.7.1. Предварительный каскад

Типовая схема резистивного каскада на пентоде приведена на рис. 4.16. От схемы с применением триода (рис. 3.6) она отличается наличием элементов R_a, C_s , включенных в цепь экранирующей сетки.

Предположим, что для расчета каскада даны следующие исходные данные: усилительный каскад должен быть реализован на пентоде типа 6Ж32П, входное напряжение $U_{вх} = 0,5$ В, выходное напряжение $U_{вых} = 6$ В, $f_n = 60$ Гц, $f_v = 15000$ Гц, напряжение источника анодного напряжения $E_a = +280$ В, частотные искажения на границах полосы ЗЧ не должны превышать 1 дБ ($M_n = M_v = 1,12$).

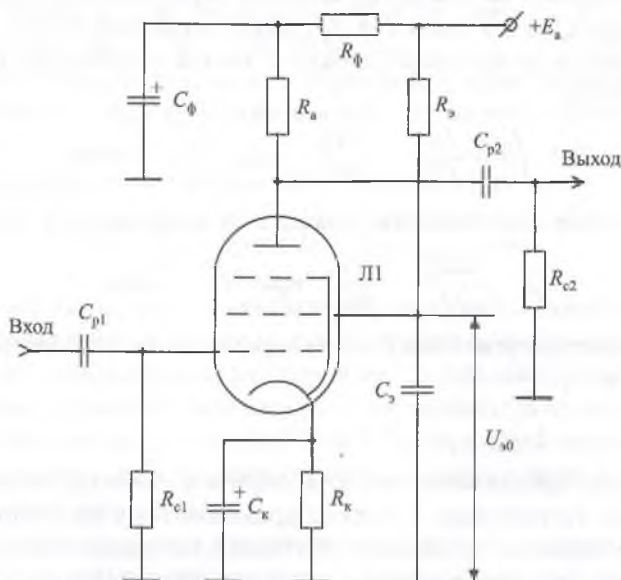


Рис. 4.16. Типовая схема резистивного каскада на пентоде

1. Коэффициент усиления каскада

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{6}{0,5} = 12.$$

2. Для нахождения сопротивления анодной нагрузки необходимо вычислить суммарную емкость C_0 участка анод 6Ж32П — управляющая сетка лампы следующего каскада. Вклад лампы 6Ж32П

$$C_1 = C_{\text{вых.Л1}} + C_{\text{мон}},$$

где $C_{\text{вых.Л1}}$ — выходная емкость лампы 6Ж32П; $C_{\text{мон}}$ — емкость монтажа. Вклад лампы следующего каскада в суммарную емкость

$$C_2 = C_{\text{вх.Л2}} + C_{\text{мон}} = C_{\text{вх.2}} + C_{\text{пр.2}}(1 + \mu_{\text{ср}}) + C_{\text{мон}},$$

где $C_{\text{вх.2}}$ и $C_{\text{пр.2}}$ — входная и проходная емкость лампы следующего каскада соответственно; $\mu_{\text{ср}}$ — среднее значение коэффициента усиления второй лампы. Суммируя два последних выражения, получаем

$$C_0 = C_{\text{вых.Л1}} + [C_{\text{вх.Л2}} + C_{\text{пр.Л2}}(1 + \mu_{\text{ср}})] + C_{\text{мон}}.$$

Следует отметить, что величины $C_{\text{вх}}$, $C_{\text{пр}}$, $C_{\text{вых}}$ и $\mu_{\text{ср}}$ приводятся для каждой лампы в таблице типовых электрических параметров. В некоторых случаях, когда табличное значение отсутствует, можно воспользоваться известным уравнением для экранированных ламп:

$$\mu = SR_i,$$

где S — крутизна; R_i — внутреннее сопротивление.

Выберем $C_{\text{мон}} = 10$ пФ, тогда (при Л1 — 6Ж32П, Л2 — 6П14П)

$$C_0 = 5,5 + [11 + 0,2(1 + 339)] + 10 = 5,5 + 11 + 68 + 10 = 94,5 \text{ пФ}.$$

3. Сопротивление анодной нагрузки

$$R_a \leq \frac{10^9 \sqrt{M_{\text{в}}^2 - 1}}{2\pi f_{\text{в}} C_0},$$

где $f_{\text{в}}$ в Гц, C_0 в пФ;

$$R_a \leq \frac{10^9 \sqrt{1,12^2 - 1}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^4 \cdot 94,5} = \frac{10^9 \sqrt{0,2544}}{890,2 \cdot 10^4} = \frac{50440}{890,2} = 56,66 \text{ кОм}.$$

Выбираем из стандартного ряда резистор сопротивлением 56 кОм.

4. Рассчитаем параметры фильтра ($R_{\text{ф}}C_{\text{ф}}$) в анодной цепи:

$$R_{\text{ф}} = (0,1 \dots 0,5) R_a = 0,1 \cdot 56 = 5,6 \text{ кОм},$$

что соответствует сопротивлению из стандартного ряда;

$$C_{\Phi} \geq \frac{(2...5) \cdot 10^4}{f_n R_{\Phi}} = \frac{3 \cdot 10^4}{60 \cdot 11} = 45,5 \text{ мкФ.}$$

Из стандартного ряда выбираем конденсатор с номинальной емкостью 47 мкФ.

5. Смещение на управляющей сетке лампы выбираем из равенства

$$-U_c = -(U_{\text{нх}} + (0,5 + 1,5)) = -(0,5 + 1,5) = -2 \text{ В,}$$

что совпадает с одной из линий на семействе анодных характеристик.

6. На графике семейства анодных характеристик строим нагрузочную линию для значения анодной нагрузки $R'_a = R_a + R_{\Phi} = -56 + 5,6 = 61,6 \text{ кОм}$, из стандартного ряда выбираем резистор с номинальным значением сопротивления, 62 кОм, при котором анодный ток (рис. 4.17)

$$I'_a = \frac{U_a}{R'_a} = \frac{280}{62000} = 4,516 \approx 4,5 \text{ мА.}$$

Рабочая точка — пересечение нагрузочной линии с характеристикой 6Ж32П при напряжении на управляющей сетке $-U_c = -2 \text{ В}$. Параметры рабочей точки: $U_{a0} = 102,28 \approx 103 \text{ В}$, $I_{a0} = 2,85 \text{ мА}$. По нагрузочной линии определяем значение крутизны в динамическом режиме и коэффициент усиления ($K_{\text{рТ}}$):

$$S_d = \frac{I_{a1} - I_{a2}}{U_{c2} - U_{c1}} = \frac{3,6 - 2}{2,5 - 1,5} = 1,6 \text{ мА/В.}$$

паспортное значение крутизны 6П32П $S = 1,8 \pm 0,5 \text{ мА/В}$. Коэффициент усиления $K_{\text{рТ}} = S_d R'_a = 1,6 \cdot 62 = 99,2$.

7. Определим параметры элементов в цепи экранной сетки (R_3, C_3), учитывая, что на экранной сетке должно быть напряжение $U_3 = 0,2 E_a = 0,2 \cdot 280 = 56 \text{ В}$, т.е. на R_3 должно быть погашено напряжение $U_{R_3} = E_a - U_3 = 280 - 56 = 224 \text{ В}$. Из рис. 4.17 находим, что ток экранной сетки при напряжении на управляющей сетке $-U_c = -2 \text{ В}$ равен $I_{30} = 0,6 \text{ мА}$, следовательно,

$$R_3 = \frac{U_{R_3}}{I_{30}} = \frac{E_a - U_3}{I_{30}} = \frac{280 - 56}{0,6} = \frac{224}{0,6 \cdot 10^{-3}} = 373,33 \text{ кОм.}$$

Из стандартного ряда выбираем резистор с номинальным значением сопротивления 390 кОм. Значение емкости в цепи экранной сет-

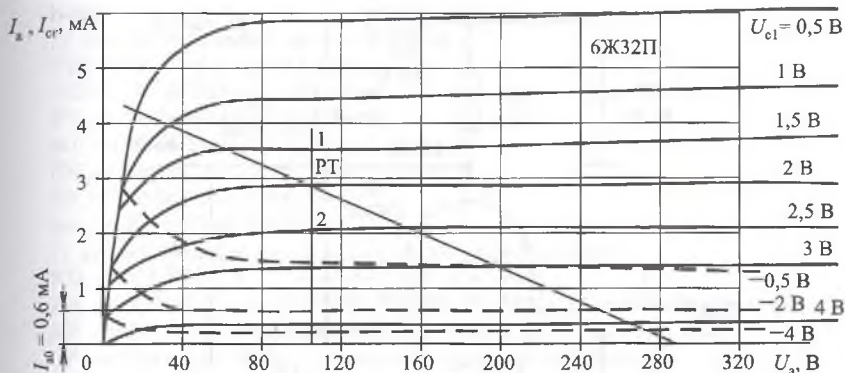


Рис. 4.17. Построение нагрузочной линии для 6Ж32П

ки C_3 определяется выражением

$$C_3 \geq \frac{5000}{f_n R_3}, \text{ мкФ},$$

где R_3 в кОм;

$$C_3 \geq \frac{5000}{60 \cdot 390} = \frac{5000}{23400} = 0,213 \text{ мкФ}.$$

Из стандартного ряда выбираем конденсатор с номинальной емкостью 0,22 мкФ на рабочее напряжение 400 В.

8. Определим элементы цепи автоматического смещения ($R_K C_K$):

$$R_K = \frac{|-U_c| \cdot 10^3}{I_{a0} + I_{c0}}; \quad C_K \geq \frac{5000 \cdot S_d}{f_n R_K},$$

где I_{a0}, I_{c0} в мА, f_n в Гц, R_K в Ом.

Сопротивление цепи автоматического смещения

$$R_K = \frac{2 \cdot 10^3}{(2,9 + 0,6)} = \frac{2000}{3,5} = 571,43 \text{ Ом}.$$

Из стандартного ряда выбираем резистор с номинальным сопротивлением 560 Ом.

Емкость цепи автоматического смещения

$$C_K \geq \frac{5000 \cdot S_d}{2\pi f_n} = \frac{5000 \cdot 1,6}{6,28 \cdot 60} = \frac{8000}{376,8} = 21,23 \text{ мкФ}.$$

Из стандартного ряда выбираем конденсатор с номинальной емкостью 22 мкФ.


```

begin
// получение данных из полей ввода
VIN := StrToFloat(Edit1.Text);
VOUT := StrToFloat(Edit2.Text);
FV := StrToInt(Edit3.Text);
MV := StrToFloat(Edit4.Text);
FN := StrToFloat(Edit5.Text);
C0 := StrToFloat(Edit6.Text);
EA := StrToFloat(Edit7.Text);
// расчет величин для построения нагрузочной линии
KU := VOUT/VIN; // коэффициент усиления
RA := (CHISL1*Sqrt(MV*MV-1))/(2*pi*FV*C0); // анодная нагрузка
RF := 0.2*RA; // сопротивление фильтра
CF := 30000/(FN*RF); // емкость конденсатора фильтра
RAF := RA+RF; // полное сопротивление в цепи анода
IA0 := EA/RAF; // ток анода
// вывод результатов вычислений
label7.Caption := 'коэффициент усиления' + FloatToStr(KU) +
'анодная нагрузка' + FloatToStr(RA) + 'кОм' +
'сопротивление фильтра' + FloatToStr(RF) + 'кОм' +
'емкость фильтра' + FloatToStr(CF) + 'мкФ' +
'полное сопротивление в цепи анода' + FloatToStr(RAF) + 'кОм' +
'ток анода' + FloatToStr(IA0) + 'мА';
end;

```

Рис. 4.19. Листинг первой подпрограммы расчета усилительного каскада на пентоде

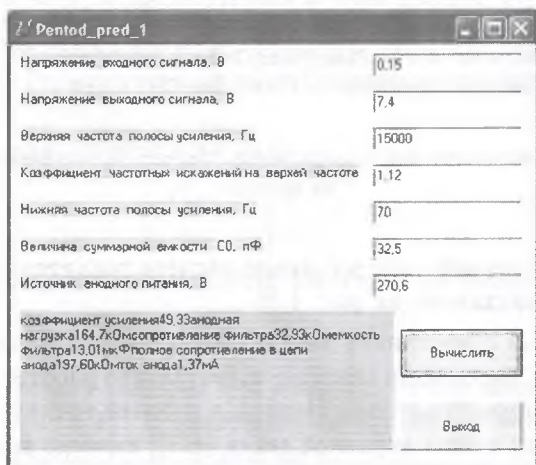


Рис. 4.20. Скриншот первой подпрограммы расчета усилительного каскада на пентоде

т конденсатора фильтра (CF), полное сопротивление в цепи анода (RAF), анодный ток (IA0).

```

begin
// получение исходных данных для расчетов из полей ввода
UA0 := StrToFloat(Edit1.Text);
IA0 := StrToFloat(Edit2.Text);
IA1 := StrToFloat(Edit3.Text);
IA2 := StrToFloat(Edit4.Text);
US11 := StrToFloat(Edit5.Text);
US22 := StrToFloat(Edit6.Text);
URE := StrToFloat(Edit7.Text);
IE0 := StrToFloat(Edit8.Text);
FN := StrToInt(Edit9.Text);
US1 := StrToFloat(Edit10.Text);
MN := StrToFloat(Edit11.Text);
RS2 := StrToFloat(Edit12.Text);
// выполнение основных расчетов
SD := (IA1-IA2)/(US22-US11); // крутизна в рабочей точке
RE := URE/IE0; // сопротивление в цепи экранной сетки
CEF := 5000000/(FN*RE); // конденсатор в цепи экранной сетки
RK := US1/(IA0+IE0); // сопротивление в цепи автосмещения
CKF := 5000*SD/(2*pi*FN); // конденсатор в цепи автосмещения
CR := CHISL1/(2*pi*FN*RS2*Sqrt(MN*MN-1)); // разделительный конденса-
сатор
// вывод результатов расчетов
label13.Caption := 'крутизна' + FloatToStr(SD) +
'экранное сопротивление' + FloatToStr(RE) + 'Ом' +
'конденсатор в цепи экр сетки' + FloatToStr(CEF) + 'мкФ' +
'резистор автосмещения' + FloatToStr(RK) + 'Ом' +
'емкость автосмещения' + FloatToStr(CKF) + 'мкФ' +
'разделительный конденсатор' + FloatToStr(CR) + 'нФ';
end;

```

Рис. 4.21. Листинг второй подпрограммы расчета усилительного каскада на пентоде

Скриншот первой подпрограммы расчета усилительного каскада на пентоде представлен на рис. 4.20.

На рис. 4.21 представлен листинг второй подпрограммы расчета усилительного каскада на пентоде, в результате работы которой выводятся параметры: крутизна пентода в рабочей точке (S), сопротивление резистора в цепи экранной сетки (RE), емкость конденсатора в цепи экранной сетки (CEF), сопротивление резистора в цепи автоматического смещения (RK), емкость конденсатора в цепи автоматического смещения (CKF), емкость разделительного конденсатора (CR).

Скриншот второй подпрограммы расчета усилительного каскада на пентоде представлен на рис. 4.22.

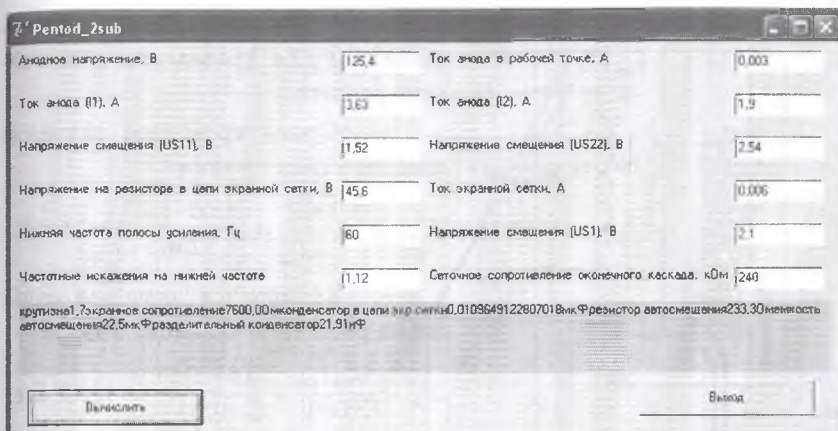


Рис. 4.22. Скриншот второй подпрограммы расчета усилительного каскада на пентоде

4.7.2. Выходной однокатный каскад

Рассчитаем оконечный каскад УЗЧ, выполненный на лучевом тетроде, типовая схема которого приведена на рис. 4.23.

Исходные данные для расчета: полезная (выходная) мощность в нагрузке $P_{\text{вых}} = 4,2$ ВА, $R_{\text{н}} = 8$ Ом, полоса усиливаемых частот — $f_{\text{н}} = 70$ Гц, $f_{\text{в}} = 14000$ Гц, неравномерность АЧХ каскада на границах полосы усиливаемых частот $M_{\text{н}} = M_{\text{в}} = 1,12$, индуктивность нагрузки $L_{\text{н}} = 0,002$ Гн, допустимый коэффициент нелинейных искажений $K_{\text{ни}} \leq 6$ %.

1. Расчетная мощность каскада

$$P = \frac{P_{\text{вых}}}{\eta_{\text{тр}}} = \frac{4,2}{0,8} = 5,25 \text{ ВА.}$$

2. Ориентировочная мощность рассеяния на аноде лампы

$$P_{\text{а}} \approx 4P = 4 \cdot 5,25 = 21 \text{ Вт.}$$

По справочнику выберем тип лампы с учетом выполнения условия $P_{\text{а.доп}} = (1,2...2)P_{\text{а}}$. В данном случае подойдет выходной лучевой тетрод типа 6П27С ($P_{\text{а.доп}} = 27,5$ Вт):

$$\frac{P_{\text{а.доп}}}{P_{\text{а}}} = \frac{27,5}{21} = 1,31.$$

По спрямленной анодно-сеточной характеристике (рис. 4.24) определяем значение параметров $I_{\text{max}} = 256$ мА, $I_{\text{а0}} = 114$ мА, $U_{\text{см}} =$

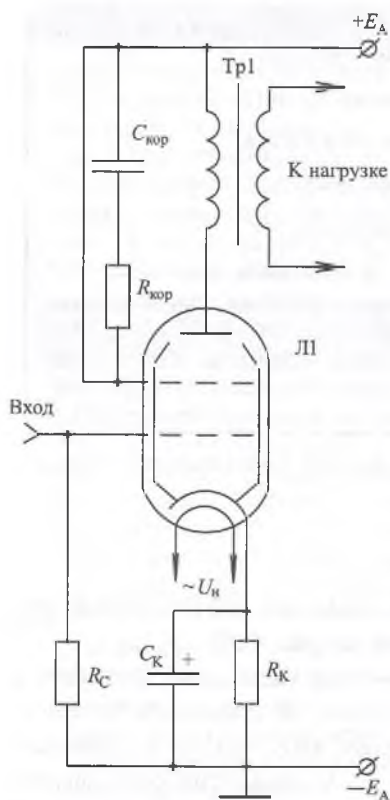


Рис. 4.23. Типовая схема од-
нотактного выходного кас-
када на лучевом тетроде

$= |E_c| = 11$ В, значения которых не-
обходимы для проведения дальней-
ших расчетов.

4. Ориентировочное значение
анодного напряжения

$$U_{a0} = \frac{8000P}{I_{\max}} = \frac{8000 \cdot 5.25}{256} = 164 \text{ В.}$$

5. Уточненное значение мощ-
ности рассеяния на аноде лампы

$$P'_a = \frac{U_{a0} I_{a0}}{1000} = \frac{164 \cdot 114}{1000} = 18,67 \text{ Вт.}$$

6. Теперь необходимо постро-
ить динамическую нагрузочную ха-
рактеристику (рис. 4.25).

На оси анодных напряжений от-
ложим значение анодного напряже-
ния, равное U_{a0} (точка 1). Из точ-
ки 1 восстановим перпендикуляр до
пересечения с характеристикой лам-
пы при напряжении смещения, рав-
ном расчетному значению E_c (точ-
ка 2). Точка 2 является рабочей
точкой лампы. Далее на семейство
анодных характеристик накладыва-
ется линейка и ее вращением вокруг

точки 2 находим такое положение, при котором длины отрезков a и b окажутся возможно более равными. Равенство этих отрезков явля-
ется условием минимальных нелинейных искажений. По полученной
динамической характеристике находим коэффициент нелинейных ис-
кажений

$$K_{\text{ни}} = 50 \left(\frac{2c - (a + b)}{a + b + c} \right) = 50 \left(\frac{2 \cdot 38 - (33 + 32)}{33 + 32 + 38} \right) = 5,33 \text{ \%}.$$

Полученный результат удовлетворяет заданному значению $K_{\text{ни}}$.

7. Определив с помощью динамической характеристики значения
параметров I_1 и U_a , проверим мощность, отдаваемую каскадом:

$$P' = \frac{U_a I_1}{2000} = \frac{102 \cdot 86}{2000} = 4,38 \text{ Вт.}$$

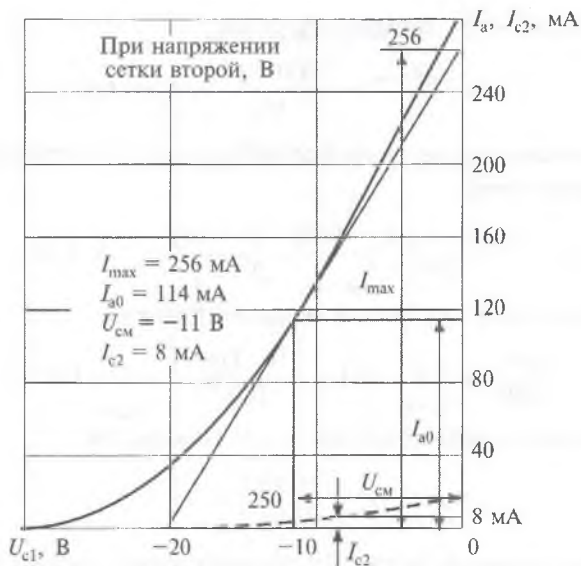


Рис. 4.24. Определение параметров каскада по анодно-сеточной характеристике

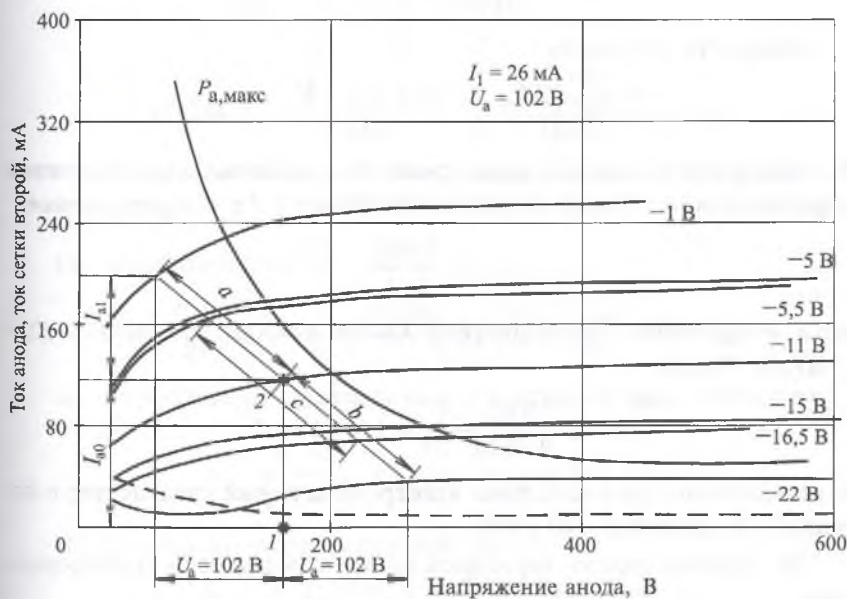


Рис. 4.25. Построение нагрузочной линии для 6П27П

8. Сопротивление анодной нагрузки

$$R_a = \frac{1000 U_a}{I_1} = \frac{1000 \cdot 102}{86} = 1186 \text{ Ом.}$$

9. Сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора по постоянному току

$$r_1 = \frac{R_a(1 - \eta_{\text{тр}})}{2} = \frac{1186 \cdot (1 - 0,8)}{2} = 118,6 \text{ Ом.}$$

10. Напряжение источника анодного питания

$$E_a = U_{a0} + \frac{I_{a0} r_1}{1000} + |E_c| = 164 + \frac{114 \cdot 118,6}{1000} + 11 = 188,52 \approx 189 \text{ В.}$$

11. Элементы цепи автоматического смещения:

$$R_k = \frac{1000 |E_c|}{I_{a0} + I_{c2}},$$

где I_{c2} — ток экранной сетки. По графику анодно-сеточной характеристики определяем $I_{c2} = 8 \text{ мА}$, следовательно,

$$R_k = \frac{1000 \cdot 11}{114 + 8} = 90,16 \text{ Ом.}$$

Мощность рассеяния

$$P_k = \frac{|E_c|(I_{a0} + I_{c2})}{1000} = \frac{11 \cdot (114 + 8)}{1000} = 1,342 \text{ Вт.}$$

Из стандартного ряда выбираем резистор с номинальным значением сопротивления 91 Ом на мощность рассеяния 2 Вт. Сопротивление

$$C_k \geq \frac{5000 S}{2\pi f_n},$$

где S — крутизна характеристики лампы в мА/В, для 6П27С $S = 10 \text{ мА/В}$. Тогда

$$C_k \geq \frac{5000 \cdot 10}{2 \cdot 3,14 \cdot 70} = 113,74 \text{ мкФ.}$$

Из стандартного ряда выбираем электролитический конденсатор с номинальной емкостью 120 мкФ.

12. Индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора

$$L_1 = \frac{R_a}{2\pi f_n \sqrt{M_n^2 - 1}} = \frac{1186}{2 \cdot 3,14 \cdot 70 \sqrt{1,12^2 - 1}} = 5,35 \text{ Гн.}$$

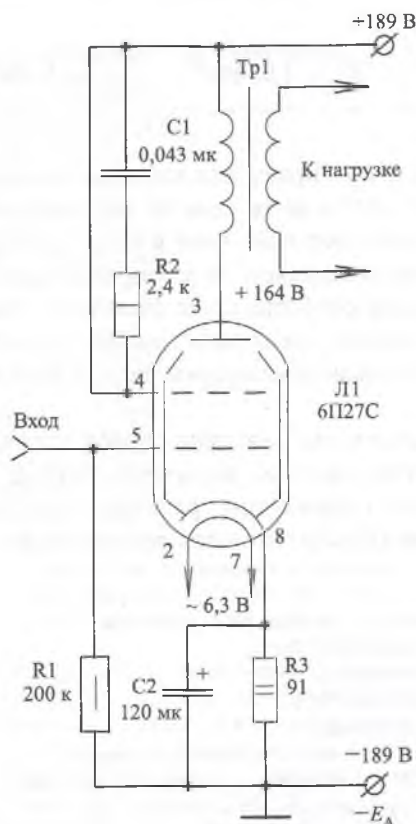


Рис. 4.26. Принципиальная схема выходного одноконтурного каскада на лучевом тетроде 6П27П

13. Индуктивность рассеяния

$$L_S \leq \frac{(R_i + R_a) \sqrt{M_n^2 - 1}}{2\pi f_n} = \frac{(15000 + 1186) \sqrt{1,12^2 - 1}}{2 \cdot 3,14 \cdot 15000} = 0,0867 \text{ Гн.}$$

14. Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$n = \sqrt{\frac{R_n}{\eta_{\text{тр}} R_a}} = \sqrt{\frac{8}{0,8 \cdot 1186}} = 0,0918.$$

15. Элементы корректирующей цепи:

$$R_{\text{кор}} = (1...2) R_a = 2 \cdot 1186 = 2374 \text{ Ом,}$$

из стандартного ряда выбираем резистор с номинальным сопротивлением 2,4 кОм;

$$C_{\text{кор}} = \frac{\left(L_S + \frac{L_n}{n^2}\right) \cdot 10^6}{R_{\text{кор}}^2} = \frac{\left(0,0867^2 + \frac{0,002}{0,0918^2}\right) \cdot 10^6}{2374^2} = 0,0435 \text{ мкФ},$$

из стандартного ряда подбираем два конденсатора с номинальной емкостью 0,033 и 0,01 мкФ и включаем их параллельно.

16. Максимальное сопротивление в цепи первой сетки при работе с автоматическим смещением по техническим условиям составляет 250 кОм. Выбираем сопротивление резистора сеточного смещения $R_c = 200$ кОм. Принципиальная схема выходного каскада на лучевом тетроде с рассчитанными номиналами радиоэлементов приведена на рис. 4.26.

На рис. 4.27 представлен листинг первой подпрограммы расчета выходного однотоктного каскада на лучевом тетроде, в результате работы которой выводятся параметры: расчетная мощность каскада (P), анодное напряжение (UA0), мощность рассеяния на аноде (P11).

```
begin
// получение исходных данных из полей ввода
POUT := StrToFloat(Edit1.Text);
IMAX := StrToFloat(Edit2.Text);
IA0 := StrToFloat(Edit3.Text);
// выполнение инструкций
P := POUT/0.8; // расчетная мощность каскада
UA0 := 8*P/IMAX; // напряжение на аноде в рабочей точке
P11 := UA0*IA0; // мощность на аноде (точно)
// вывод результатов расчетов
label4.Caption := 'расчетная мощность' + FloatToStr(P) + 'BA' + 'Вт' +
'анодное напряжение' + FloatToStr(UA0) + 'В' +
'мощность на аноде точно' + FloatToStr(P11) + 'Вт';
end;
```

Рис. 4.27. Листинг первой подпрограммы расчета выходного однотоктного каскада на лучевом тетроде

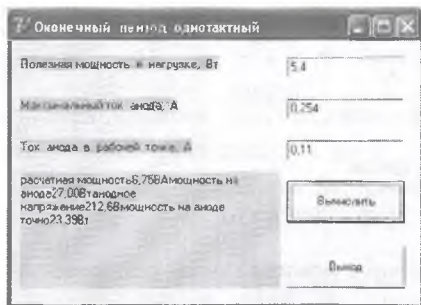


Рис. 4.28. Скриншот первой подпрограммы расчета выходного однотоктного каскада на лучевом тетроде

```

begin
// получение исходных данных из полей ввода
A := StrToInt(Edit1.Text);
B := StrToInt(Edit2.Text);
C := StrToInt(Edit3.Text);
UA := StrToFloat(Edit4.Text);
I1 := StrToFloat(Edit5.Text);
UA0 := StrToFloat(Edit6.Text);
IA0 := StrToFloat(Edit7.Text);
USM := StrToFloat(Edit8.Text);
IS2 := StrToFloat(Edit9.Text);
S := StrToFloat(Edit10.Text);
FN := StrToInt(Edit11.Text);
MN := StrToFloat(Edit12.Text);
FV := StrToInt(Edit13.Text);
MV := StrToFloat(Edit14.Text);
RI := StrToFloat(Edit15.Text);
LN := StrToFloat(Edit16.Text);
RN := StrToInt(Edit17.Text);
// выполнение инструкций
KNI := 50*(2*C-(A+B))/(A+B+C); // нелинейные искажения
PN := (UA*I1); // мощность, отдаваемая в нагрузку
RA := UA/I1; // сопротивление анодной нагрузки
R1 := 0.1*RA; // сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора
EA := UA0+(IA0*R1)+USM; // напряжение источника анодного напряжения
RK := USM/(IA0+IS2); // сопротивление автосмещения
PRK := USM*(IA0+IS2); // мощность сопротивления автосмещения
CEF := (5000*S)/(2*pi*FN); // емкость конденсатора автосмещения
L1 := RA/(2*pi*FN*Sqrt(MN*MN-1)); // индуктивность первичной обмотки
LS := ((RI+RA)*Sqrt(MV*MV-1))/(2*pi*FV); // индуктивность рассеяния
NTR := Sqrt(RN/(0.8*RA)); // коэффициент трансформации выходника
RKOR := 2*RA; // сопротивление корректирующего резистора
CKOR := (LS+LN/Sqr(NTR))*NUM1/Sqr(RKOR); // емкость конденсатора
коррекции
// вывод результатов расчетов однотактного выходного каскада на пентоде
label18.Caption := 'нелинейные искажения' + FloatToStr(KNI) + '%' +
'мощность в нагрузке' + FloatToStr(PN) + 'Вт' +
'анодная нагрузка' + FloatToStr(RA) + 'Ом' +
'первичная обмотка' + FloatToStr(R1) + 'Ом'
'анодное питание' + FloatToStr(EA) + 'В' +
'резистор автосмещения' + FloatToStr(RK) + 'Ом' +
'мощ рез автосмещения' + FloatToStr(PRK) + 'Вт' +
'емкость автосмещения' + FloatToStr(CEF) + 'мкФ' +
'индукт перв обмотки' + FloatToStr(L1) + 'Гн' +
'инд рассеяния' + FloatToStr(LS) + 'Гн' +
'коэф трансформации' + FloatToStr(NTR) +
'резис коррекции' + FloatToStr(RKOR) + 'кОм' +
'конд коррекции' + FloatToStr(CKOR) + 'мкФ';
end;

```

Рис. 4.29. Листинг второй подпрограммы расчета выходного однотактного каскада на лучевом тетроде

Скриншот первой подпрограммы расчета выходного одноконтурного каскада на лучевом тетроде представлен на рис. 4.28.

На рис. 4.29 представлен листинг второй подпрограммы расчета выходного одноконтурного каскада на лучевом тетроде, в результате работы которой выводятся параметры: коэффициент нелинейных искажений (KNI), полезная мощность в нагрузке (PN), величина сопротивления анодной нагрузки (RA), сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора (R1), напряжение источника анодного напряжения (EA), величина резистора в цепи автоматического смещения (RK) и его мощность (PRK), емкость конденсатора в цепи автоматического смещения (CEF), индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора (L1), индуктивность рассеяния (LS), коэффициент трансформации выходного трансформатора (NTR), величина сопротивления корректирующего резистора (RKOR), емкость корректирующего конденсатора (CKOR).

Скриншот второй подпрограммы расчета выходного одноконтурного каскада на лучевом тетроде представлен на рис. 4.30.

7 Pentad 11akt 2sub

Длина отрезка a, мм	33	Крутизна, мА/В	9,85
Длина отрезка b, мм	32	Нижняя частота полосы усиления, Гц	60
Длина отрезка c, мм	38	Неравномерность АЧХ на нижней частоте	1,12
Напряжение UА, В	92,8	Верхняя частота полосы усиления	14000
Ток анода IА, А	0,086	Неравномерность АЧХ на верхней частоте	1,12
Анодное напряжение в рабочей точке, В	164,1	Внутреннее сопротивление, кОм	14500
Анодный ток в рабочей точке, А	0,102	Индуктивность нагрузки, Гн	0,003
Напряжение смещения, В	10,9	Сопротивление нагрузки, Ом	8
Ток экранной сетки, А	0,006		

нелинейные искажения 5,34% мощность в нагрузке 7,988 Вт анодная нагрузка 1079,07 Ом первичная обмотка 107,90 мА анодное питание 186,06 В резистор авто смещения 100,90 мОм рез авто смещения 1,188 В емкость авто смещения 130,64 мкФ индукт перв обмотки 5,675 Гн инд рассеяния 0,0893 Гн коэф трансформации 0,0963 резист коррекции 2158,140 мОм конденсатор коррекции 0,0887 мкФ

Вычислить

Выход

Рис. 4.30. Скриншот второй подпрограммы расчета выходного одноконтурного каскада на лучевом тетроде

4.7.3. Выходной двухтактный каскад

Рассчитаем выходной двухтактный каскад УЗЧ по схеме, представленной на рис. 4.31, с параметрами: $P_{\text{вых}} = 9,5$ ВА, $R_{\text{н}} = 4$ Ом, полоса усиливаемых частот $\Delta f = 70 \dots 15000$ Гц, неравномерность АЧХ на границах полосы усиления $M_{\text{н}} = M_{\text{в}} = 1,12$, допустимый $K_{\text{ни}} \leq 5\%$.

1. Максимальная мощность рассеяния на аноде лампы одного плеча

$$P'_{\text{а. max}} = \frac{P_{\text{вых}}}{2\eta_{\text{тр}}} = \frac{9,5}{2 \cdot 0,8} = 5,94 \text{ ВА.}$$

2. Мощность, отдаваемая в нагрузку каждой лампой,

$$P_1 = \frac{P_{\text{вых}}}{2\eta_{\text{тр}}} = \frac{9,5}{2 \cdot 1 \cdot 0,8} = 5,94 \text{ Вт.}$$

3. Напряжение на аноде пентода при максимальном импульсе анодного тока $I_{\text{м}} = 100$ мА для лампы 6П14П определяется выражением

$$U_{\text{а0}} = \frac{5000 P_1}{I_{\text{м}}} = \frac{5000 \cdot 5,94}{100} = 297 \text{ В.}$$

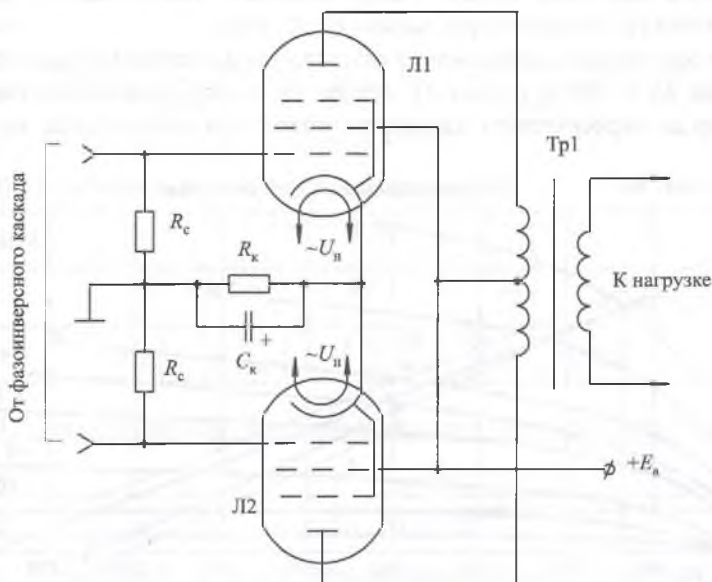


Рис. 4.31. Типовая схема двухтактного выходного каскада на экранированных лампах

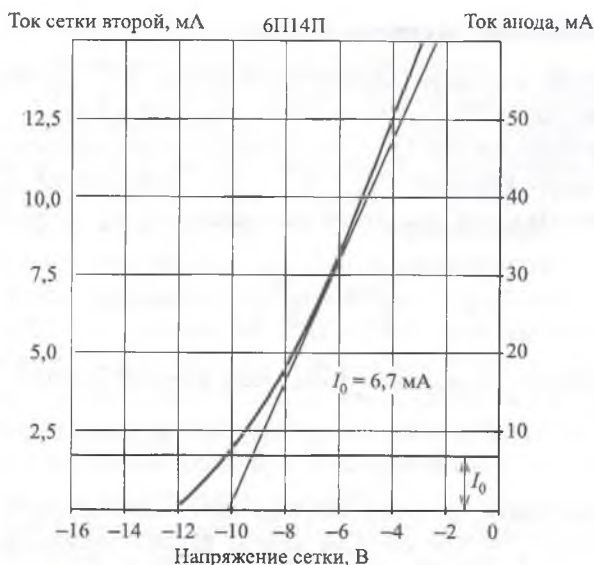


Рис. 4.32. Определение сеточного смещения по анодно-сеточной характеристике

4. По спрямленной анодно-сеточной характеристике (рис. 4.32) определяем значение сеточного смещения $U_c = |E_c| = 10 \text{ В}$.

5. На семействе анодных характеристик лампы 6П14П строим динамическую нагрузочную линию (рис. 4.33).

На оси анодных напряжений откладываем значение анодного напряжения $E_a = 297 \text{ В}$ (точка 1). Из точки 1 восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с характеристикой при напряжении на сетке



Рис. 4.33. Построение нагрузочной линии для лампы 6П14П

равном $E_c = -10$ В, (точка 2). От значения минимального анодного напряжения $U_{a.\min} = 50$ В восстановим перпендикуляр до пересечения с характеристикой при $E_c = 0$ В проекция полученной точки на ось анодных токов (точка 3) дает значение максимального значения тока. Через точки 1 и 3 проводим прямую, отрезок прямой между точками 1 и 3 есть динамическая нагрузочная линия. Из графика полученной нагрузочной линии получаем данные необходимые для дальнейших расчетов: $I_M = 86$ мА, $I_0 = 14$ мА, $U_{a0} = 297$ В, $U_a = U_{a0} - U_{a.\min} = 297 - 50 = 247$ В.

6. Уточненное значение полезной мощности, отдаваемой каждым пентодом,

$$P'_1 = \frac{U_a I_M}{4000} = \frac{247 \cdot 86}{4000} = 5,31 \text{ Вт.}$$

7. Сопротивление нагрузки между двумя анодами

$$R_{aA} = \frac{4000 U_a}{m I_M} = \frac{4000 \cdot 247}{1 \cdot 86} = 11488 \text{ Ом.}$$

8. Мощность, рассеиваемая на аноде в режиме покоя,

$$P_{a0} = \frac{U_{a0} I_0}{1000} = \frac{297 \cdot 14}{1000} = 4,16 \text{ Вт.}$$

9. Мощность, рассеиваемая на аноде в режиме максимального сигнала,

$$P_{a.\max} = \frac{U_{a0}(0,318 I_M + 0,42 I_0)}{1000} - P'_1 = \frac{297(0,318 \cdot 86 + 0,42 \cdot 14)}{1000} - 5,31 = 4,56 \text{ Вт.}$$

10. Коэффициент нелинейных искажений

$$K_{\text{ни}} = 50 \sqrt{\left(\frac{\chi}{\chi + 2}\right)^2 + \left(\frac{2b - a}{b + 2a}\right)^2} =$$

$$= 50 \sqrt{\left(\frac{0,15}{0,15 + 2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 59 - 102}{59 + 2 \cdot 102}\right)^2} = 4,63 \text{ \%}.$$

11. Индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора

$$L_1 = \frac{R_{aA}}{2\pi f_n \sqrt{M_n^2 - 1}} = \frac{11488}{2\pi \cdot 70 \sqrt{1,12^2 - 1}} = 51,8 \text{ Гн.}$$

12. Индуктивность рассеяния выходного трансформатора

$$L_s \leq \frac{L_1}{200} \leq \frac{51,8}{200} = 0,259.$$

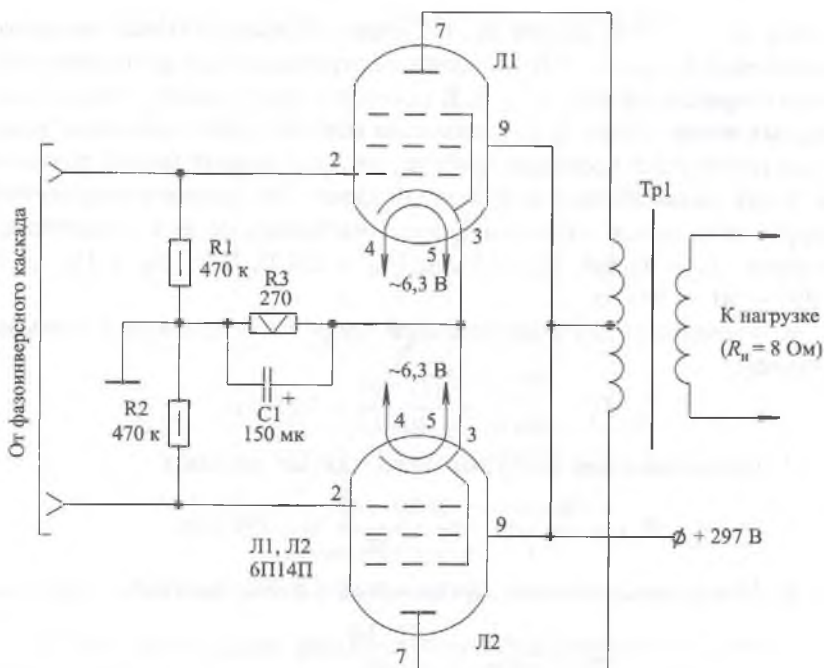


Рис. 4.34. Принципиальная схема выходного двухтактного каскада на пентодах 6П14П

13. Элементы цепи автоматического смещения:

$$R_K = \frac{5000U_c}{2(I_M + I_3)},$$

где I_3 — ток экранирующей сетки при напряжении смещения на управляющей сетке $U_c = 0$ В, следовательно,

$$R_K = \frac{5000 \cdot 10}{2(86 + 7,6)} = 267,1 \text{ Ом};$$

$$P_K = 2(I_{a. \max} + I_3)^2 R_K = 2 \cdot (86 \cdot 10^{-3} + 7,6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 267,1 = 4,81 \text{ Вт}.$$

Из стандартного ряда выбираем резистор с номинальным сопротивлением 270 Ом на мощность рассеяния 5 Вт;

$$C_K \geq \frac{5000S}{2\pi f_n} \geq \frac{5000 \cdot 11,3}{2 \cdot 3,14 \cdot 70} = 128,52 \text{ мкФ}.$$

Из стандартного ряда выбираем электролитический конденсатор с номинальной емкостью 150 мкФ.

```

begin
// получение данных из полей ввода
POUT := StrToFloat(Edit1.Text);
IM := StrToFloat(Edit2.Text);
M := StrToInt(Edit3.Text);
// вычисление параметров
P1 := POUT/(M*1.6); //
UA0 := 5000*P1/IM; //
// вывод результатов вычислений
label4.Caption := 'мощ от одного пентода' + FloatToStr(P1) + 'Вт' +
'анодное напряжение' + FloatToStr(UA0) + 'В';
end;

```

Рис. 4.35. Листинг первой подпрограммы расчета выходного двухтактного каскада на пентодах

14. Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$n = \sqrt{\frac{R_H}{\eta_{\text{тр}} R_{aA}}} = \sqrt{\frac{8}{0,8 \cdot 11488}} = 0,0295.$$

Принципиальная схема выходного двухтактного каскада на пентодах типа 6П14П представлена на рис. 4.34.

На рис. 4.35 представлен листинг первой подпрограммы расчета выходного двухтактного каскада на пентодах, в результате работы которой выводятся параметры: мощность отдаваемая одним пентодом (P_1), анодное напряжение (UA_0).

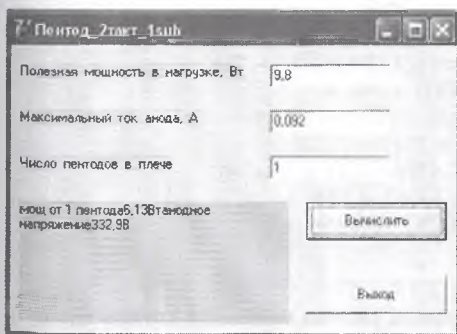


Рис. 4.36. Скриншот первой подпрограммы расчета выходного двухтактного каскада на пентодах

Скриншот первой подпрограммы расчета выходного двухтактного каскада на пентодах представлен на рис. 4.36.

На рис. 4.37 представлен листинг второй подпрограммы расчета выходного двухтактного каскада на пентодах, в результате работы которой выводятся параметры: мощность рассеяния на аноде P_1 , сопротивление анодной нагрузки R_{AA} , мощность рассеяния на аноде в режиме покоя PA_0 ,

мощность рассеяния на аноде в режиме максимальной выходной мощности PA_{MAX} , коэффициент нелинейных искажений KNI , индуктивность первичной обмотки выходного трансформатора L_1 , индуктивность рассеяния LS , величина и мощность резистора автоматического

```

begin
// получение исходных данных из полей ввода
USM := StrToFloat(Edit1.Text);
IM1 := StrToFloat(Edit2.Text);
IO := StrToFloat(Edit3.Text);
UA := StrToFloat(Edit4.Text);
A := StrToInt(Edit5.Text);
B := StrToInt(Edit6.Text);
UA0 := StrToFloat(Edit7.Text);
FN := StrToInt(Edit8.Text);
MN := StrToFloat(Edit9.Text);
IE := StrToFloat(Edit10.Text);
M := StrToInt(Edit11.Text);
S := StrToFloat(Edit12.Text);
RN := StrToFloat(Edit13.Text);
// выполнение инструкций
P1 := UA*IM1/4; //
RAA := (4*UA)/(M*IM1); //
PA0 := UA0*IO; //
PAMAX := UA0*(0.318*IM1+0.42*IO); //
KNI := 50*Sqrt(Sqr(0.0476)+Sqr((2*B-A)/(2*A+B))); //
L1 := RAA/(2*pi*FN*Sqrt(MN*MN-1)); //
LS := L1/200; //
RK := (2.5*USM)/(IM1+IE); //
PRK := 2*Sqr(IM1+IE)*RK; //
CK := (2500*S)/(pi*FN); //
NTR := Sqrt(RN/(0.8*RAA)); //
// вывод результатов расчетов
label14.Caption := 'мощ на аноде' + FloatToStr(P1) + 'Вт' +
'сопр нагрузки' + FloatToStr(RAA) + 'Ом' +
'мощ анода в реж покоя' + FloatToStr(PA0) + 'Вт' +
'мощ анода в макс режиме' + FloatToStr(PAMAX) + 'Вт' +
'нелин искажения' + FloatToStr(KNI) + '%' +
'инд перв обмотки' + FloatToStr(L1) + 'Гн' +
'инд рассеяния' + FloatToStr(LS) + 'Гн' +
'сопр автосмещ' + FloatToStrF(RK,ffFixed,4,1) + 'Ом' +
'мощ сопр автосмещ' + FloatToStr(PRK) + 'Вт' +
'емк конд автосмещ' + FloatToStr(CK) + 'мкФ' +
'коэф трансф' + FloatToStr(NTR);
end;

```

Рис. 4.37. Листинг второй подпрограммы расчета выходного двухтактного каскада на пентодах

смещения RK и PRK, емкость конденсатора в цепи автоматического смещения и коэффициент трансформации NTR.

Скриншот второй подпрограммы расчета выходного двухтактного каскада на пентодах представлен на рис. 4.38.

7' Пентод_2такт_2sub

Напряжение смещения (U _{SM}), В	10,8	Нижняя частота полосы усиления, Гц	60
Максимальный ток анода (I _{M1}), А	0,094	Неравномерность АЧХ на нижней частоте	1,12
Начальный ток анода (I ₀), А	0,014	Ток экранной сетки (I _E), А	0,0076
Анодное напряжение (U _A), В	247,5	Число пентодов в плече, M	1
Длина отрезка a, мм	102	Кругизна, мА/В	11,2
Длина отрезка b, мм	59	Сопротивления нагрузки, Ом	8
Анодное напряжение (U _{A0}), В	297		

мощ на аноде 5,028 Вт сопр нагрузки 10531,90 мВт анода в реж
 покоя 4,168 мВт анода в макс режиме 10,628 Вт нелиин искажения 3,96% инд
 перв обмотки 55,390 Г инд рассеяния 0,2763 Г нсопр автосмещ 265,70 мВт
 сопр автосмещ 5,498 темк конд автосмещ 148,55 мкФ коэф трансф 0,031

Вычислить

Выход

Рис. 4.38. Скриншот второй подпрограммы расчета выходного двухтактного каскада на пентодах

5 ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ЛАМПОВЫХ УЗЧ

5.1. Работа электронного стабилизатора

Качественные параметры ламповых УЗЧ невозможно получить без обеспечения усилительных каскадов стабильным анодным напряжением. Особенно сильно нестабильность анодного напряжения сказывается на оконечных усилительных однотактных каскадах, выполненных на пентодах. Наиболее радикальным способом получения постоянного анодного напряжения является применение электронных стабилизаторов напряжения. Применение электронного стабилизатора позволяет уменьшить пульсации выпрямленного напряжения в K раз (K — коэффициент стабилизации).

Рассмотрим подробно простую схему стабилизатора анодного напряжения лампового УЗЧ выполненного на электронных лампах (рис. 5.1).

Схема состоит из регулирующей лампы Λ_1 (в качестве которой применяют обычно мощные триоды типов 6Н5С, 6Н13С, 6С41С или выходные лучевые тетроды типов 6П7С, 6П45С в триодном включении), усилителя постоянного тока (УПТ) на лампе Λ_2 (здесь применимы триоды с большим коэффициентом усиления 6Н2П, триодные части 6Ф3П и 6Г7) и источника образцового напряжения на стабилитроне VD1 с напряжением стабилизации 150...170 В. Шунтирующий резистор $R_{ш}$ включается параллельно регулирующей лампе в том случае, если при расчетах рассеиваемая мощность на аноде превышает предельно допустимую. Применение $R_{ш}$ является крайней мерой, так как это снижает коэффициент стабилизации приблизительно в 1,5 раза. Более предпочтительным является параллельное включение нескольких регулирующих ламп.

Предположим, что в результате повышения напряжения питающей сети или снижения тока нагрузки $I_{н1}$ повысилось напряжение на входе стабилизатора. В этом случае также уменьшится отрицательное напряжение на сетке лампы Λ_2 . Анодный ток I_{Λ_2} , проходя по анодной нагрузке R_{Λ_2} , увеличится и вызовет увеличение отрицательного

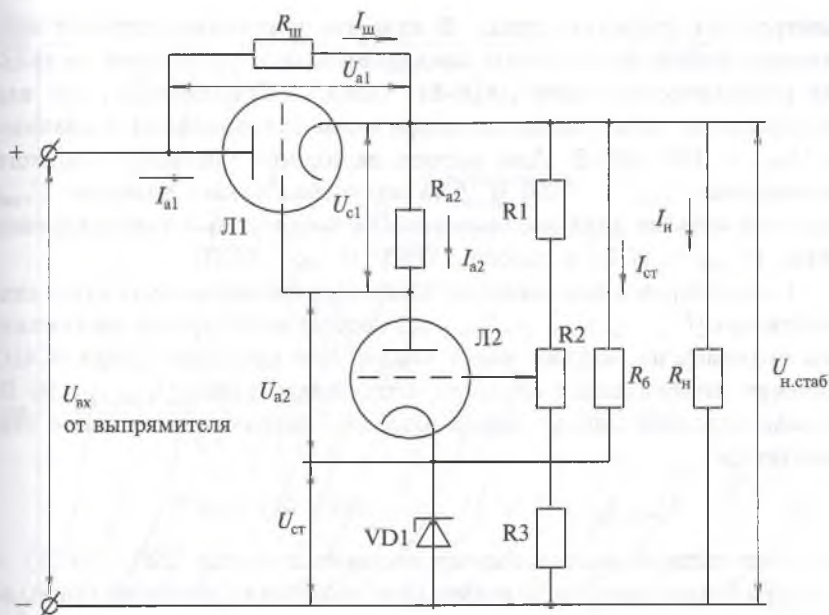


Рис. 5.1 Типовая схема стабилизатора анодного напряжения на электронных лампах

смещения на сетке лампы Л1. Это приведет к увеличению внутреннего сопротивления (R_i) Л1, что приведет в свою очередь к увеличению падения напряжения на регулирующей лампе Л1 на столько, на сколько увеличилось напряжение на входе стабилизатора. Таким образом, выходное стабилизированное напряжение останется практически неизменным. Расчет источника питания лампового УЗЧ, помимо расчета электронного стабилизатора, включает также расчет силового трансформатора, выпрямителя и сглаживающего фильтра.

5.2. Расчет электронного стабилизатора

Входные данные для расчета электронного стабилизатора следующие: входное напряжение питающей сети $\approx U_c = 220^{+5}_{-10} \%$, частота питающей сети $f_c = 50$ Гц, выходное стабилизированное напряжение $U_{ст} = +330$ В, суммарный ток нагрузки $I'_{общ} = I_n + I_{ст} = 85 + 20 = 105$ мА, так как источник опорного напряжения питается от выходного стабилизированного напряжения.

Выберем классическую схему стабилизатора с усилителем постоянного тока (УПТ) на лампе 6Н2П с большим коэффициентом усиления ($\mu = 97,5$) (см. рис. 5.1). В качестве регулирующей лампы выберем триод 6С41С, специально предназначенной для работы в

электронных стабилизаторах. В качестве источника опорного напряжения удобно использовать последовательное соединение нескольких стабилитронов серий Д816-817 (табл. 7 Приложения), так как это позволяет гибко выбирать напряжение стабилизации в диапазоне $U_{\text{стаб}} = 120 \dots 180$ В. Для расчета зададимся значением опорного напряжения $U_{\text{стаб}} = +150$ В. Для получения такого значения $U_{\text{стаб}}$ подходит цепь из двух последовательно соединенных стабилитронов Д816Г ($U_{\text{стаб}} = 47$ В) и одного Д816Д ($U_{\text{стаб}} = 56$ В).

1. Для определения диапазона входных напряжений на входе стабилизатора ($U_{\text{min.вх}}, U_{\text{ном.вх}}, U_{\text{max.вх}}$) необходимо задаться минимальным падением на регулирующей лампе. Для двойного триода 6С41С значение минимального анодного напряжения равно $U_{\text{a.min}} = 90$ В. Отсюда значение минимального входного напряжения на входе стабилизатора

$$U_{\text{min.вх}} = U_{\text{ст}} + U_{\text{a.min}} = 330 + 90 = 420 \text{ В},$$

что соответствует минимальному напряжению сети $(220 - 10 \%) = 198$ В. Номинальное и максимальное входные напряжения стабилизатора соответственно равны:

$$U_{\text{ном.вх}} = \frac{U_{\text{min.вх}}}{0,9} = \frac{420}{0,9} = 467 \text{ В};$$

$$U_{\text{max.вх}} = 1,05 U_{\text{ном.вх}} = 467 \cdot 1,05 = 490,35 \text{ В}.$$

Таким образом, падение напряжения на регулирующей лампе в номинальном и двух крайних режимах равны:

$$U_{\text{a.Л1.min}} = 420 - 330 = 90 \text{ В}; \quad U_{\text{a.Л1.ном}} = 467 - 330 = 137 \text{ В},$$

$$U_{\text{a.Л1.max}} = 490,35 - 330 = 160,35 \text{ В}.$$

2. В указанных режимах рассеиваемая мощность на аноде регулирующей лампы

$$P_{\text{a.Л1.min}} = U_{\text{a.Л1.min}} I'_{\text{общ}} = 90 \cdot 0,105 = 9,45 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{a.Л1.ном}} = U_{\text{a.Л1.ном}} I'_{\text{общ}} = 137 \cdot 0,105 = 14,38 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{a.Л1.max}} = U_{\text{a.Л1.max}} I'_{\text{общ}} = 160,35 \cdot 0,105 = 16,84 \text{ Вт}.$$

Так как максимальная мощность рассеяния на аноде лампы 6С41С равна 25 Вт, вполне возможно обойтись без шунтирующего резистора. Производя расчет стабилизатора на электронных лампах, необходимо по возможности стремиться не включать параллельно регулирующей лампе шунтирующий резистор, так как это снижает коэффициент стабилизации в 1,3...1,5 раза.

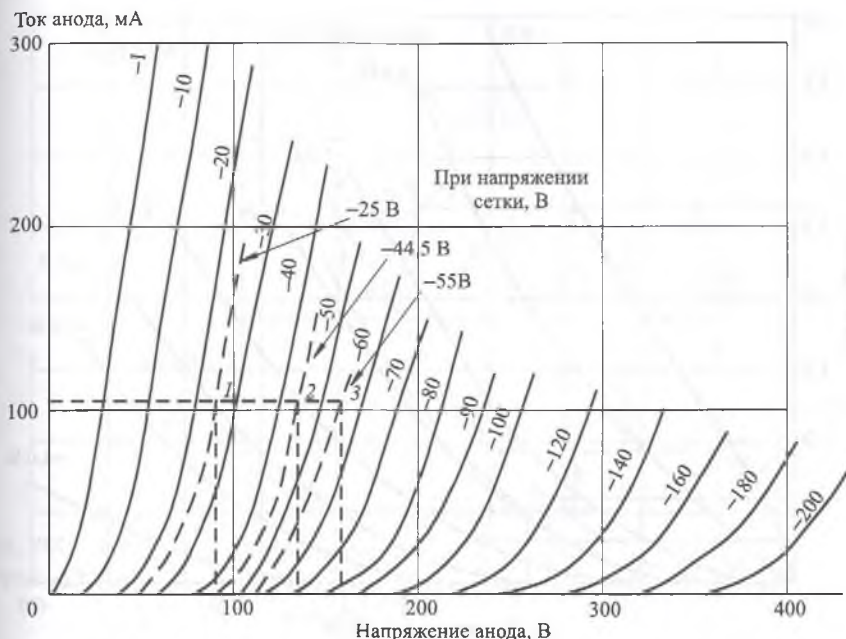


Рис. 5.2. Определение сеточного смещения регулирующей лампы

3. Смещение на сетке регулирующей лампы находится по графику семейства анодных характеристик по известным значениям анодного тока (I_a) и анодного напряжения (U_a) (рис. 5.2):

$$U_{c1} = -25 \text{ В}; \quad U_{c2} = -44,5 \text{ В}; \quad U_{c3} = -55 \text{ В}.$$

4. Для определения анодного тока усилительной лампы Л2 (6Н2П) необходимо сначала задаться сопротивлением резистора анодной нагрузки:

$$R_{a.Л2} = 2R_i = 2 \cdot 46,3 = 92,6 \text{ кОм}.$$

Из стандартного ряда выбираем резистор с номинальным сопротивлением 91 кОм. Тогда анодный ток усилительной лампы

$$I_{a.Л2} = \frac{|U_{c.Л1}|}{R_{a.Л2}} = \frac{|-25|}{91 \cdot 10^3} = 2,74 \cdot 10^{-4} \approx 0,3 \text{ мА};$$

$$I_{a.Л2} = \frac{|U_{c.Л1}|}{R_{a.Л2}} = \frac{|-44,5|}{91 \cdot 10^3} = 4,9 \cdot 10^{-4} = 0,49 \text{ мА};$$

$$I_{a.Л2} = \frac{|U_{c.Л1}|}{R_{a.Л2}} = \frac{|-55|}{91 \cdot 10^3} = 6,0 \cdot 10^{-4} = 0,6 \text{ мА}.$$

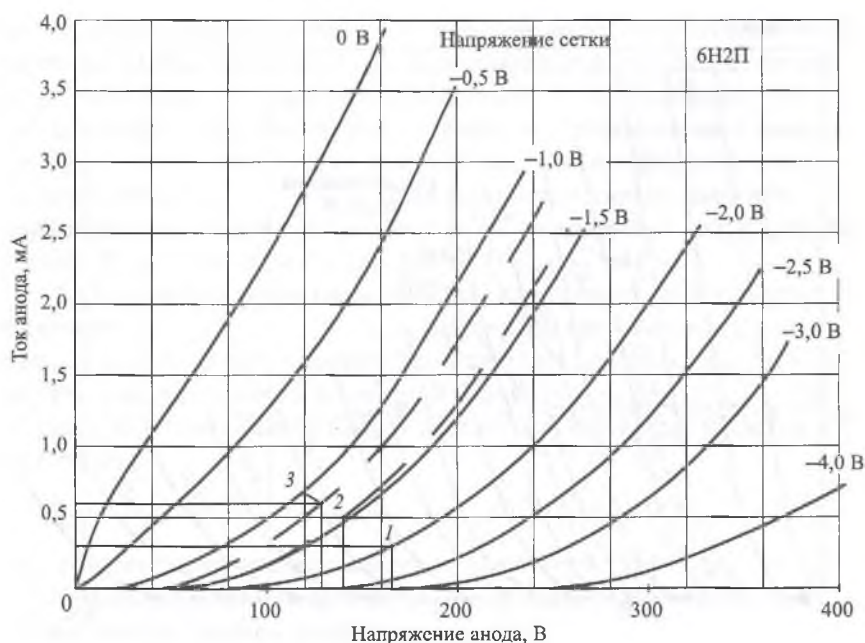


Рис. 5.3. Определение сеточного смещения усилительной лампы

Таблица 5.1

Входные и расчетные параметры стабилизатора на электронных лампах

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Напряжение питающей сети, В	220	220	220
Ток нагрузки I_n , мА	85	85	85
Напряжение на выходе стабилизатора $U_{ст}$, В	330	330	330
Общий ток стабилизатора $I_{общ}$, мА	105	105	105
Входное напряжение стабилизатора $U_{вх}$, В	420,0	467,0	490,4
Анодное напряжение регулирующей лампы $U_{ал1}$, В	90,0	137,0	160,4
Ток через шунтирующий резистор $I_{ш}$, мА	—	—	—
Ток анода регулирующей лампы $I_{ал1}$, мА	105	105	105
Мощность рассеивания на аноде регулирующей лампы $P_{ал1}$	9,45	14,38	16,84
Мощность на шунтирующем резисторе $P_{ш}$, Вт	—	—	—
Сеточное напряжение регулирующей лампы $U_{сэл1}$, В	-25,0	-44,5	-55,0
Ток анода усилительной лампы $I_{ал2}$, мА	0,3	0,49	0,6
Анодное напряжение усилительной лампы $U_{ал2}$, В	155,0	135,5	125,0
Сеточное смещение усилительной лампы $U_{сэл2}$, В	-2,0	-1,45	-1,2

ряжения $U_{ст}$ потенциометром R_2 . Суммарное сопротивление $R_d = R_1 + R_2 + R_3$ можно вычислить, допустив, что через него протекает ток 1 мА. Следовательно, суммарное сопротивление делителя

$$R_d = \frac{U_{ст}}{10^{-3}} = \frac{330}{10^{-3}} = 330 \text{ кОм.}$$

Для обеспечения плавной установки выходного напряжения делитель удобно составить из двух постоянных и одного переменного резисторов. Переменный резистор может быть номиналом 100 кОм, постоянные резисторы могут быть равны $R_1 = 130 \text{ кОм}$, $R_3 = 100 \text{ кОм}$. Для удобства расчета, а также для проверки правильности или внесения изменений, например, в исходные данные, результаты расчетов сведены в табл. 5.1.

Расчет электронного стабилизатора на этом можно считать законченным. Принципиальная схема полученного стабилизатора приведена на рис. 5.4.

5.3. Расчет выпрямителя, питающего электронный стабилизатор

Из расчета электронного стабилизатора напряжения, питающего ламповый УЗЧ, следует, что выпрямитель, работающий на стабилизатор, должен обеспечивать при номинальном напряжении питающей сети выходное напряжение $U_{ном} = +470 \text{ В}$, ток потребления стабилизатора $I'_{общ} = 105 \text{ мА}$. Кроме этого, выходным напряжением выпрямителя должны питаться дополнительные цепи с током потребления $I'' = 65 \text{ мА}$. Исходя из этого, выполним расчет выпрямителя, построенного по двухполупериодной схеме, с суммарным выходным током $I_0 = 170 \text{ мА}$.

1. Исходя из предположения, что падение напряжения на дросселе фильтра равно $U_{др} = 15 \text{ В}$, получим данные для расчета выпрямителя, который может быть собран по классической схеме (рис. 5.5):

$$U_0 = 470 + 15 = 485 \text{ В; } I_0 = 105 + 65 = 170 \text{ мА.}$$

2. Для выбора типа кенотрона (табл. 2 Приложения) необходимо с помощью табл. 5 Приложения рассчитать величины $I_0/2$, $U_{обр}$, I_{max} :

$$I_0/2 = 170/2 = 85 \text{ мА; } U_{обр} = 3U_0 = 3 \cdot 485 = 1455 \text{ В;}$$

$$I_{max} = 3,5I_0 = 3,5 \cdot 170 = 595 \text{ мА.}$$

Из табл. 2 Приложения можно выбрать несколько типов кенотронов, удовлетворяющих расчетным параметрам: 5Ц3С, 5Ц8С, 5Ц9С.

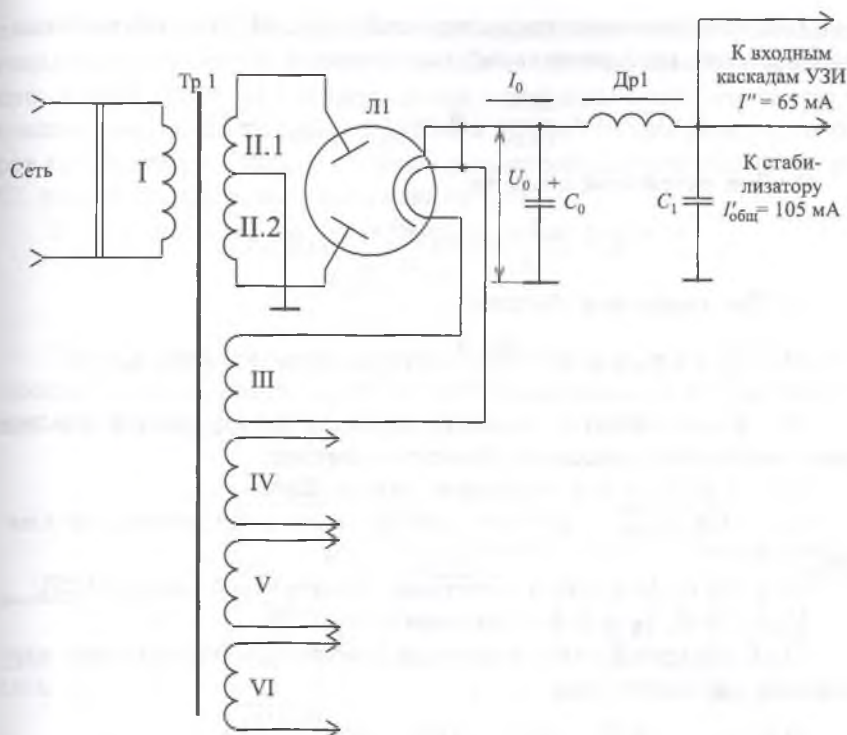


Рис. 5.5. Схема выпрямителя для питания стабилизатора напряжения

Выберем для дальнейших расчетов кенотрон типа 5Ц8С с $R_i = 200$ Ом.

3. Сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$r_{\text{тр}} = k \frac{U_0}{I_0 \sqrt[4]{U_0 I_0}} = 0,18 \cdot \frac{485}{0,17 \cdot \sqrt[4]{485 \cdot 0,17}} = 169,5 \text{ Ом.}$$

4. Сопротивление фазы выпрямителя

$$R_{\Phi} = R_i + r_{\text{тр}} = 200 + 169,5 = 369,5 \text{ Ом.}$$

5. Для определения напряжения на вторичной (анодной) обмотке необходимо вычислить вспомогательный коэффициент

$$A = \frac{\pi I_0 R_{\Phi}}{m U_0} = \frac{3,14 \cdot 0,17 \cdot 369,5}{2 \cdot 485} = 0,203.$$

6. Напряжение на вторичной (анодной) обмотке

$$U_2 = U_0(0,75 + 1,2A) = 485 \cdot (0,75 + 1,2 \cdot 0,203) = 481,9 \text{ В.}$$

7. Для определения тока вторичной (анодной) обмотки необходимо вычислить вспомогательный коэффициент D :

$$D = 2 + \frac{3,65}{100A} = 2 + \frac{3,65}{100 \cdot 0,203} = 2,18.$$

8. Ток вторичной обмотки

$$I_2 = D \frac{I_0}{2} = 2,18 \cdot \frac{170}{2} = 185,3 \text{ мА}.$$

9. Ток первичной обмотки

$$I_1 = 1,7nI_2 = 1,7 \cdot \frac{481,9}{220} \cdot 0,1853 = 0,69 \text{ А} = 690 \text{ мА}.$$

10. Кроме обмотки анодного питания трансформатор должен иметь несколько накальных обмоток, а именно:

$U_3 = 5 \text{ В}$, $I_3 = 5 \text{ А}$ — питание накала 5Ц8С;

$U_4 = 6,3 \text{ В}$, $I_4 = 2,7 \text{ А}$ — питание накала регулирующей лампы 6С41С;

$U_5 = 6,3 \text{ В}$, $I_5 = 0,34 \text{ А}$ — питание усилительной лампы 6Н2П;

$U_6 = 6,3 \text{ В}$, $I_6 = 6 \text{ А}$ — питание ламп УЗЧ.

11. Суммарный ток в первичной обмотке при номинальном напряжении питающей сети

$$\begin{aligned} I'_1 &= I_1 + \frac{I_3 U_3}{U_1} + \frac{I_4 U_4}{U_1} + \frac{I_5 U_5}{U_1} + \frac{I_6 U_6}{U_1} = \\ &= 0,69 + \frac{5 \cdot 5}{220} + \frac{6,3 \cdot (2,7 + 0,34 + 6)}{220} = 1,06 \text{ А}. \end{aligned}$$

12. Входная емкость выпрямителя

$$C_0 = \frac{2 \cdot 10^4 \text{ А}}{R_\Phi} = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot 0,203}{369,5} = 10,98 \text{ мкФ} \approx 11 \text{ мкФ},$$

в качестве C_0 удобно применить последовательное включение двух конденсаторов с номинальной емкостью 22 мкФ на рабочее напряжение не ниже 400 В, зашунтировав каждый конденсатор разрядным резистором с номинальным сопротивлением 680 кОм.

13. Задаваясь уровнем пульсаций на выходе фильтра $K_n = 1 \%$, находим

$$L_1 C_1 = \frac{100}{p^2 K_n} = \frac{100}{2^2 \cdot 1} = 25 \text{ Гн} \cdot \text{мкФ}.$$

14. Минимальное значение емкости выходного конденсатора

$$C_1 \geq \frac{1,5 \cdot 10^4 I_0}{pU} = \frac{1,5 \cdot 10^4 \cdot 0,17}{2 \cdot 470} = 2,71 \text{ мкФ},$$

т.е. в качестве С1 можно применить последовательное включение двух конденсаторов с номинальной емкостью 47 мкФ на рабочее напряжение не ниже 400 В, зашунтировав каждый конденсатор резистором с номинальным сопротивлением 680 кОм. С учетом разброса параметров конденсаторов примем значение суммарной емкости конденсатора С1 равной стандартному значению 22 мкФ.

15. Необходимая индуктивность дросселя фильтра

$$L_1 = \frac{L_1 C_1}{C_1} = \frac{25}{22} = 1,14 \text{ Гп.}$$

Принципиальная схема источника питания лампового УЗЧ, включающая в себя силовой трансформатор, выпрямитель и сглаживающий фильтр, представлена на рис. 5.6.

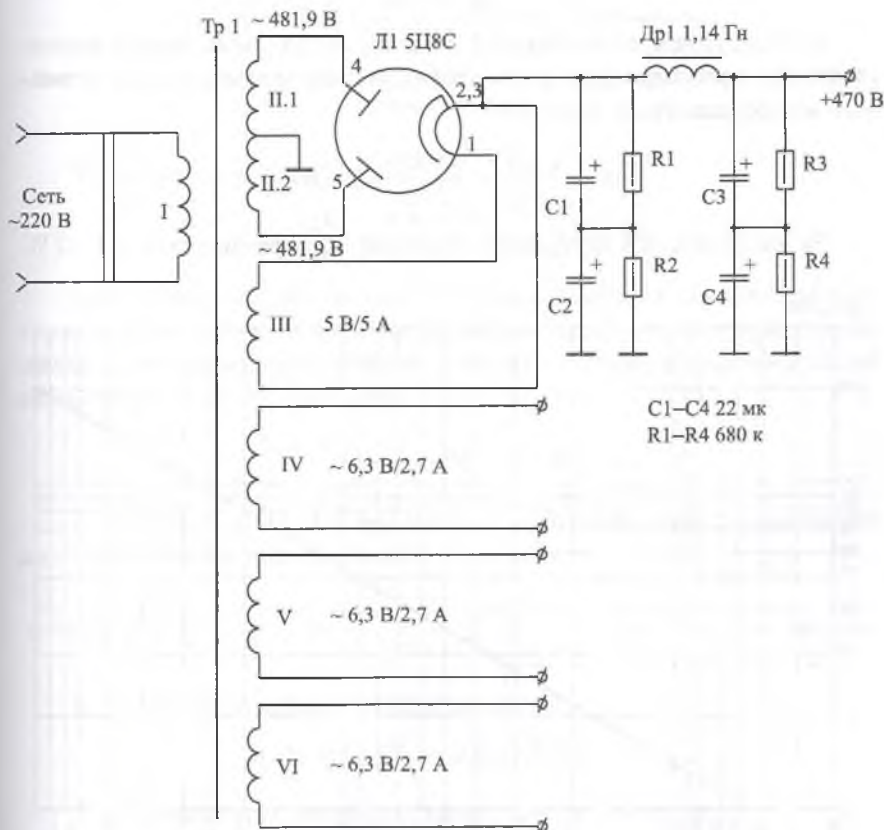


Рис. 5.6. Принципиальная схема источника питания, включающая силовой трансформатор, выпрямитель и сглаживающий фильтр

5.4. Конструктивный расчет дросселя сглаживающего фильтра

1. Для расчета дросселя фильтра необходимо определить

$$L_1 I_0^2 = 1,14 \cdot 0,17^2 = 0,0329.$$

2. По рис. 5.7 определим значение

$$Q_c l_c = 27,5 \text{ см}^3.$$

3. По табл. 4 Приложения выбираем тип пластин, из которых будет набран пакет сердечника дросселя: Ш16 $a = 1,6 \text{ см}$, $b = 1,6 \text{ см}$, $h = 3,8 \text{ см}$, $l_c = 13,35 \text{ см}$, $Q_0 = 6,08 \text{ см}^2$. Толщина пакета сердечника

$$c = \frac{Q_c l_c}{a l_c} = \frac{27,5}{1,6 \cdot 13,35} = 1,29 \text{ см}.$$

4. Определим оптимальную толщину воздушного зазора магнитопровода дросселя. Для этого необходимо вычислить вспомогательный коэффициент M (рис. 5.8):

$$M = \frac{L_1 I_0^2}{Q_c l_c} = \frac{0,0329}{27,5} = 0,0012.$$

Затем по рис. 5.8 определяем значение коэффициента $l_Z = 0,42 \%$.



Рис. 5.7. Определение параметров сердечника дросселя фильтра

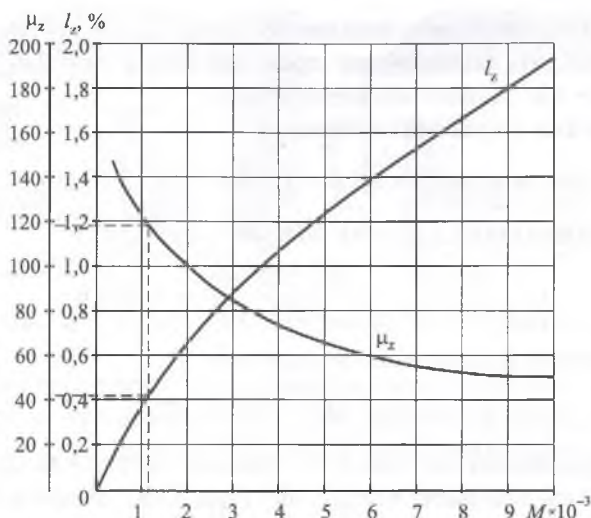


Рис. 5.8. Графики для определения воздушного зазора дросселя и магнитной проницаемости

Толщина воздушного зазора

$$l_3 = \frac{l_z l_c}{100} = \frac{0,42 \cdot 13,35}{100} = 0,056 \text{ см.}$$

При сборке пластин магнитопровода воздушный зазор в силу конструктивных особенностей делится на две части, следовательно, оптимальная толщина изоляционной прокладки, образующая воздушный зазор должна иметь толщину

$$\frac{l_3}{2} = \frac{0,056}{2} = 0,028 \text{ см} \approx 0,3 \text{ мм.}$$

5. По рис. 5.8 определяем магнитную проницаемость сердечника $\mu_z = 117$. Число витков обмотки дросселя

$$w = 10^4 \sqrt{\frac{L_1 l_c}{1,26 \mu_z Q_c}} = 10^4 \sqrt{\frac{1,14 \cdot 13,35}{1,26 \cdot 117 \cdot 2,064}} = 2236,45 \approx 2240 \text{ витков.}$$

6. Диаметр провода обмотки дросселя

$$d = (0,65 \dots 0,8) \sqrt{I_0} = 0,65 \sqrt{0,17} = 0,27 \text{ мм.}$$

7. Коэффициент заполнения окна магнитопровода

$$K_m = \frac{0,8 w d^2}{100 Q_0} = \frac{0,8 \cdot 2240 \cdot 0,27^2}{100 \cdot 6,08} = 0,215.$$

Полученный коэффициент заполнения окна $K_M < 0,4$, следовательно, обмотка дросселя, выполненная проводом диаметром 0,27 мм, уместится в окне выбранного магнитопровода.

8. Средняя длина витка обмотки

$$l_M = 2(a + c) + \pi b = 2(1,6 + 1,29) + 3,14 \cdot 1,6 = 10,8 \text{ см.}$$

9. Сопротивление дросселя постоянному току

$$r_d = \frac{225 w l_M}{d^2 \cdot 10^6} = \frac{225 \cdot 2240 \cdot 10,8}{0,27^2 \cdot 10^6} = 75 \text{ Ом.}$$

10. Падение напряжения на дросселе

$$U_d = I_0 r_d = 0,17 \cdot 75 = 12,75 \text{ В.}$$

Падение напряжения на дросселе оказалось меньше на 2,25 В, чем предполагалось при расчете стабилизатора. Отклонение такого уровня является вполне допустимым и не потребует пересчета данных.

5.5. Конструктивный расчет силового трансформатора

В существующей литературе вопросам расчета и изготовлению силовых трансформаторов для питания радиоэлектронной аппаратуры уделено большое внимание. Ниже затрагиваются вопросы выбора типа сердечника, числа витков обмоток трансформатора и диаметра обмоточных проводов.

Геометрические размеры сердечника силового трансформатора зависят от отдаваемой в нагрузку мощности. В трансформаторах, повышающая обмотка которых работает на кенотронную схему выпрямителя, выполненную по одно-двухполупериодной схеме выпрямления, габаритная мощность повышающей обмотки учитывается с помощью коэффициентов (табл. 6 Приложения). Это происходит по причине наличия в повышающей обмотке постоянной составляющей выпрямленного тока. Таким образом, для подсчета габаритной мощности трансформатора следует учитывать, на какой тип выпрямителя нагружена каждая обмотка.

Рассчитаем силовой трансформатор, предназначенный для питания лампового УЗЧ.

1. Габаритная мощность трансформатора с учетом всех вторичных обмоток

$$\begin{aligned} P_{\text{габ}} &= 1,7 U_2 I_2 + U_3 I_3 + U_4 I_4 + U_5 I_5 + U_6 I_6 = \\ &= 1,7(481,9 \cdot 0,1853) + 5 \cdot 5 + 6,3 \cdot (2,7 + 0,34 + 6) = 233,15 \text{ ВА.} \end{aligned}$$

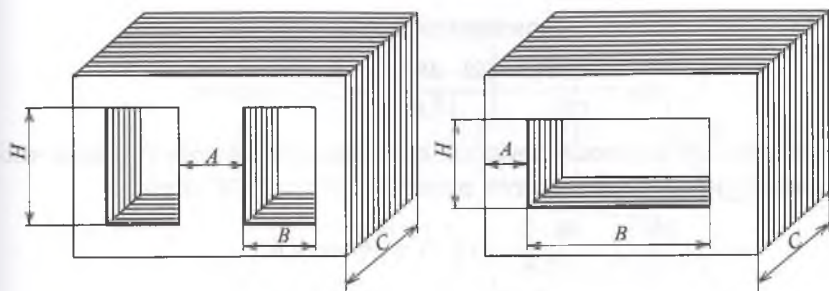


Рис. 5.9. Типы сердечников силовых трансформаторов

Размеры сердечника определяются сечением железа Q_c и площадью окна Q_o , в котором располагаются обмотки трансформатора. Величины Q_c и Q_o связаны с габаритной мощностью следующим соотношением:

$$Q_c Q_o = 1,6 P_{\text{габ.}}$$

Причем это соотношение справедливо как для броневых, так и для стержневых сердечников (рис. 5.9).

Основные расчетные величины, связывающие геометрические размеры магнитопровода:

Броневой (Ш-образный) сердечник Стержневой сердечник

$$Q_c = AC;$$

$$Q_c = AC;$$

$$Q_o = BH;$$

$$Q_o = BH;$$

$$l_c = 2(B + H) + \pi A/2;$$

$$l_c = 2(B + H) + \pi A;$$

$$l_m = 2(A + C) + \pi B.$$

$$l_m = 2(A + C) + \pi B/2.$$

2. Определяем коэффициент $Q_c Q_o$, полагая, что обмотки трансформатора будут выполнены эмалированным проводом, например ПЭВ-2:

$$Q_c Q_o = 1,6 P_{\text{габ}} = 1,6 \cdot 233,15 = 373 \text{ см}^4.$$

3. Для магнитопровода выбираем стандартные пластины Ш-40 с окном 30×70 мм. Необходимая толщина пакета

$$C = \frac{Q_c Q_o}{ABH} = \frac{373}{4 \cdot 3 \cdot 7} = 4,45 \text{ см.}$$

4. Сечение сердечника

$$Q_c = AC = 4 \cdot 4,45 = 17,8 \text{ см}^2.$$

5. Число витков первичной обмотки трансформатора

$$w_1 = \frac{50 U_1}{Q_c} = \frac{50 \cdot 220}{17,8} = 617,97 \approx 620 \text{ витков.}$$

6. Число витков вторичных обмоток:

$$w_2 = \frac{56U_2}{Q_c} = \frac{56 \cdot 481,9}{17,8} = 1516 \text{ витков,}$$

что составляет половину повышающей (анодной) обмотки. Общее число витков вторичной обмотки равно $2 \cdot 1516 = 3032$ витка;

$$w_3 = \frac{56U_3}{Q_c} = \frac{56 \cdot 5}{17,8} = 15,73 \approx 16 \text{ витков;}$$

$$w_4 = w_5 = w_6 = \frac{56U_3}{Q_c} = \frac{56 \cdot 6,3}{17,8} = 19,82 \approx 20 \text{ витков.}$$

7. Определим диаметры обмоточных проводов без изоляции с последующим округлением до стандартных размеров:

$$d_1 = 0,7\sqrt{I_1} = 0,7\sqrt{0,69} = 0,581 \text{ мм} \approx 0,6 \text{ мм;}$$

$$d_2 = 0,7\sqrt{I_2} = 0,7\sqrt{0,1853} = 0,301 \text{ мм} \approx 0,3 \text{ мм;}$$

$$d_3 = 0,7\sqrt{I_3} = 0,7\sqrt{5} = 1,565 \text{ мм} \approx 1,6 \text{ мм;}$$

$$d_4 = 0,7\sqrt{I_4} = 0,7\sqrt{2,7} = 1,15 \text{ мм} \approx 1,2 \text{ мм;}$$

$$d_5 = 0,7\sqrt{I_5} = 0,7\sqrt{0,34} = 0,408 \text{ мм} \approx 0,42 \text{ мм;}$$

$$d_6 = 0,7\sqrt{I_6} = 0,7\sqrt{6} = 1,714 \text{ мм} \approx 1,8 \text{ мм.}$$

5.6. Практическая реализация ламповых усилителей

Рассчитаем стереофонический вариант лампового двухкаскадного УЗЧ. Первый каскад каждого канала выполнен в виде резистивного усилителя на $1/2$ лампы 6Н4П, оконечный каскад с трансформаторным выходом — на лампе 6П14П (рис. 5.10).

Зададимся начальными условиями: входное напряжение $U_{\text{вх}} = 0,2$ В, выходное напряжение $U_{\text{вых}} = U_{c0} = 6,0$ В (такое напряжение предназначено для «раскачки» оконечного каскада на лампе 6П14П), $f_n = 60$ Гц, $f_v = 12000$ Гц, неравномерность АЧХ на границах полосы усиления не более 1 дБ ($M_n = M_v = 1,12$), напряжение источника анодного напряжения $E_A = +270$ В.

Расчет предварительного каскада

1. Коэффициент усиления каскада

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{6,0}{0,25} = 24.$$

2. Сопротивление анодной нагрузки

$$R_2 = (2 \dots 5) R_i = 2 \cdot 23,5 = 47,0 \text{ кОм.}$$

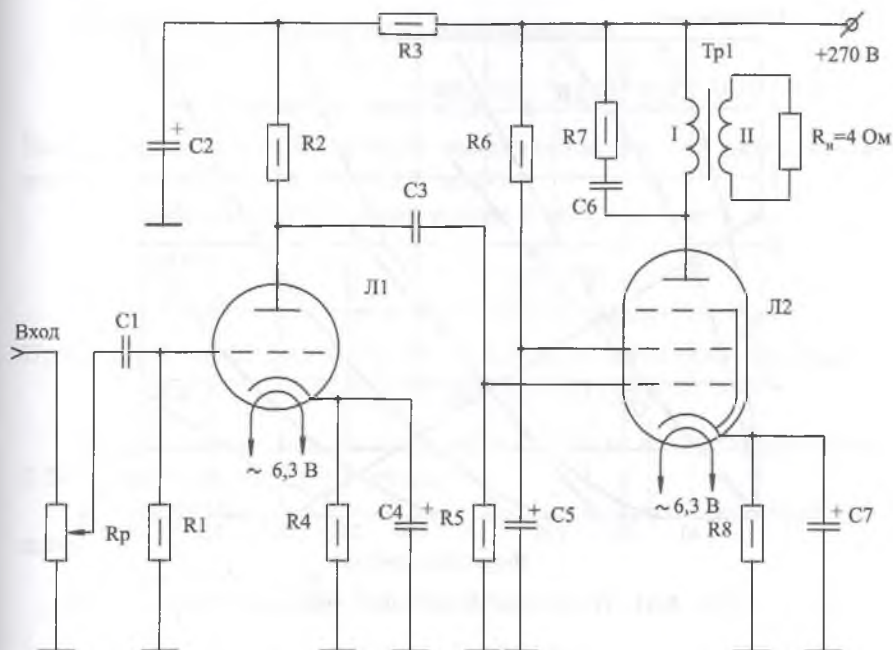


Рис. 5.10. Принципиальная схема стереофонического УЗЧ (показан один канал)

3. Сопротивление фильтра

$$R3 = (0,1 \dots 0,5) R2 = 0,3 \cdot 47,0 = 14,1 \text{ кОм.}$$

Выбираем резистор с номинальным сопротивлением 15 кОм.

4. Емкость конденсатора фильтра

$$C2 = \frac{(2 \dots 5) \cdot 10^4}{f_n R3} = \frac{3 \cdot 10^4}{60 \cdot 14,1} = 35,46 \text{ мкФ.}$$

Выбираем электролитический конденсатор стандартной номинальной емкости 33 мкФ.

4. Суммарное сопротивление в анодной цепи

$$R'_a = R2 + R3 = 47 + 14,1 = 61,1 \text{ кОм.}$$

5. Смещение на управляющей сетке лампы выбираем из равенства

$$-U_c = -(U_{вх} + (0,5 \dots 1,5)) = -(0,25 + 1,5) = -1,75 \text{ В.}$$

Ближайшее значение сеточного смещения $-U_c = -2 \text{ В.}$

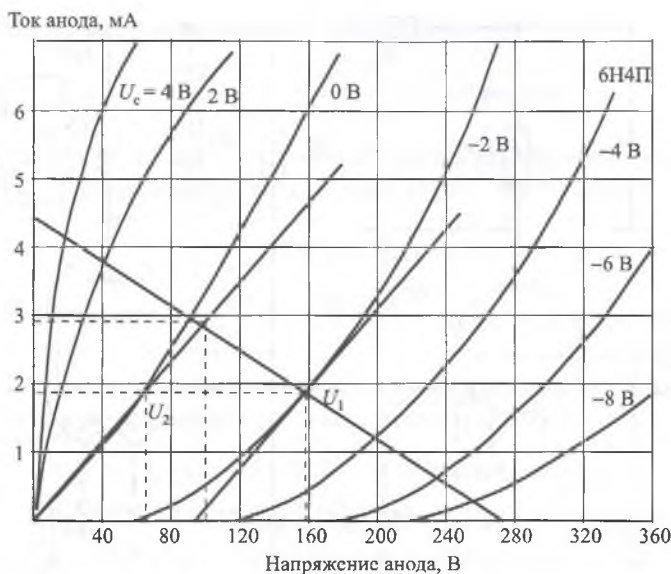


Рис. 5.11. Построение нагрузочной линии для 6Н4П

6. На графике семейства анодных характеристик строим нагрузочную линию для значения анодной нагрузки R'_a , при котором анодный ток равен $I'_a = U_a/R'_a = 270/61100 = 4.42$ мА (рис. 5.11).

7. Определяем внутреннее сопротивление триода в рабочем режиме:

$$U_a = 100 \text{ В}; \quad I_a = 2,9 \text{ мА}; \quad R_{ид} = \frac{100}{2,9} = 34,48 \text{ кОм}.$$

Коэффициент усиления в рабочем режиме

$$\mu_d = \frac{U_1 - U_2}{\Delta U_c} = \frac{158 - 62}{2} = 48.$$

8. Сопротивление резистора сеточного смещения

$$R_1 = (5 \dots 10) R_a = 7 \cdot 47 = 329 \text{ кОм},$$

что с учетом допуска соответствует номинальному значению сопротивления из стандартного ряда 330 кОм. Так как следующий за триодным каскад оконечный (последний), то R_{c2} (сопротивление утечки) можно выбрать по справочнику. Для 6П14П сопротивление сеточного смещения при выходной мощности до 8 Вт $R_{c \max} = 300$ кОм, поэтому выбираем $R_{c2} = 240$ кОм.

9. Емкость разделительных конденсаторов

$$C1 = C3 = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 240 \sqrt{1,12^2 - 1}} = \frac{10^6}{45613,9} = 21,923 \text{ нФ.}$$

Выбираем стандартное значение номинальной емкости разделительных конденсаторов 22 нФ (0,022 мкФ).

10. Коэффициент усиления триода в выбранном режиме

$$K = \frac{\mu_d}{1 + \frac{R_{ид}}{R_a} + \frac{R_{ид}}{R_c}} = \frac{48}{1 + \frac{34,48}{47} + \frac{34,48}{240}} = 25,57.$$

При таком коэффициенте усиления выходное напряжение каскада

$$U_{вых} = KU_{вх} = 25,57 \cdot 0,25 = 6,39 \text{ В.}$$

Превышение выходного напряжения каскада выше расчетного на 0,39 В является несущественным.

11. Рассчитаем величины элементов цепи автоматического смещения:

$$R4 = \frac{1000|U_c|}{I_{a0}} = \frac{1000 \cdot 2}{1,85} = 1081,1 \text{ Ом;}$$

$$C4 \geq \frac{35 \cdot 10^3}{R_{ид}f_n(1 + R_a/R_{ид})} = \frac{35 \cdot 10^3}{34,48 \cdot 60(1 + 47/34,48)} = 7,15 \text{ мкФ.}$$

Стандартные значения элементов цепи автоматического смещения $C4 = 10 \text{ мкФ}$, $R4 = 1100 \text{ Ом} = 1,1 \text{ кОм}$.

Рассчитаем выходной каскад, который работает в типовом режиме ($U_a = +250...270 \text{ В}$, $U_{c2} = +240 \text{ В}$, $U_{c1} = -6 \text{ В}$), таким образом, чтобы на сопротивлении нагрузки $R_H = 4 \text{ Ом}$ выделялась мощность $P = 2,4 \text{ Вт}$, полоса усиливаемых частот $f_n = 60 \text{ Гц}$, $f_v = 12000 \text{ Гц}$, неравномерность АЧХ каскада на границах полосы усиливаемых частот $M_n = M_v = 1,12$, $E_A = +270 \text{ В}$, индуктивность нагрузки $L_n = 0,002 \text{ Гн}$, допустимый коэффициент нелинейных искажений $K_{ни} \leq 2 \%$.

Расчет оконечного каскада

1. Максимальная выходная мощность на выходе получится при условии

$$U_{вх} = |U_{c1}| = 6 \text{ В.}$$

На семействе анодных характеристик (рис. 5.12) отметим рабочую точку (РТ), которая получается при пересечении перпендикуляра, восстановленного из точки $U_a = +270 \text{ В}$, и анодной характеристики при $U_{c1} = -6 \text{ В}$.

Значение анодного тока в рабочей точке $I_{a0} = 46 \text{ мА}$.

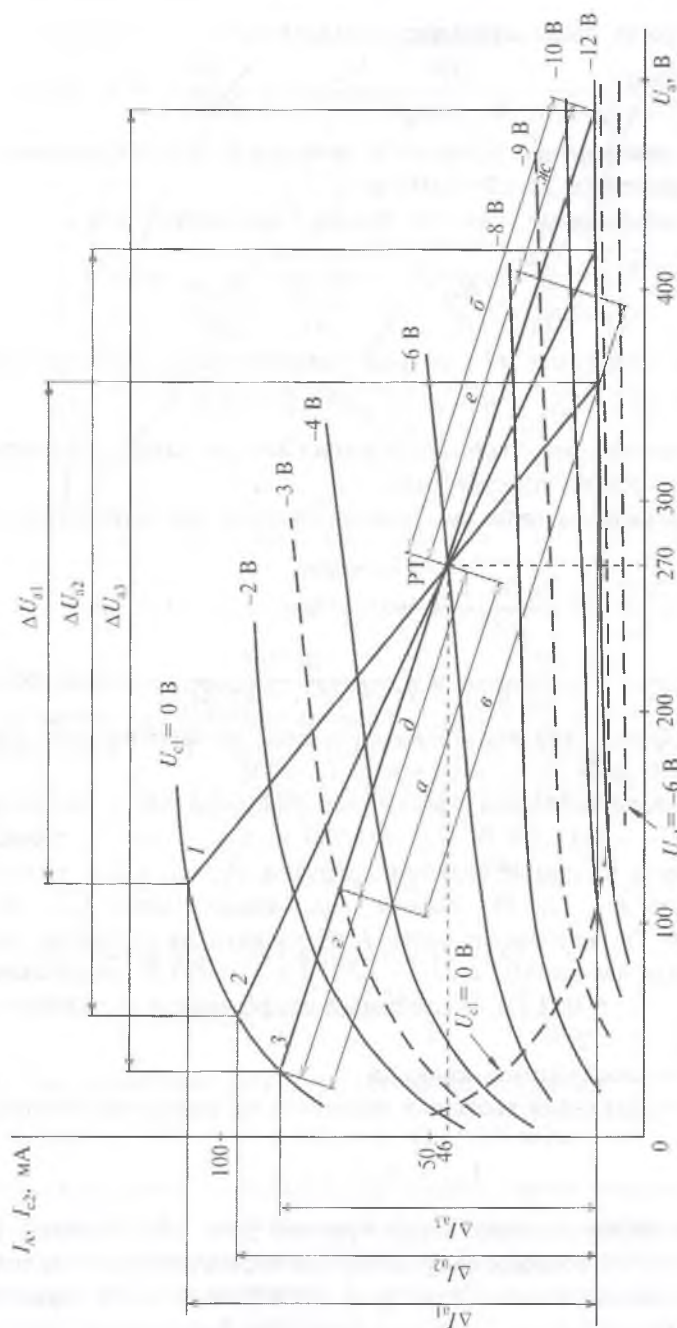


Рис. 5.12. Определение оптимального режима выходной лампы

Таблица 5.2

Параметры оконечного каскада и длины отрезков нагрузочной линии

Параметр	Нагрузочная прямая		
	1	2	3
ΔI_a , мА	98	86	76
ΔU_a , В	238	364	454
R_a , кОм	2,429	4,232	5,974
$P_{\text{вых. лам.}}$, Вт	2,915	3,913	4,313
$P_{\text{вых.}}$, Вт	2,33	3,13	3,45
a , мм	97	117	126
b , мм	56	84	112
ϑ , мм	88	122	153
z , мм	47	50	45
δ , мм	51	68	80
e , мм	37	54	72
$\mathcal{X}$, мм	19	30	40
K_{r2} , %	0,1270	0,0764	0,0270
K_{r3} , %	-0,0048	-0,0665	-0,0870
K_{r4} , %	-0,1120	-0,0170	-0,0121
$K_{r. \text{сум.}}$, %	0,17	0,10	0,09

2. Через рабочую точку под произвольными углами проведем три нагрузочные прямые. По нагрузочным прямым находим значения ΔI_{a1} , ΔU_{a1} , ΔI_{a2} , ΔU_{a2} , ΔI_{a3} , ΔU_{a3} , величины отрезков a , b , ϑ , z , δ , e , $\mathcal{X}$, которые необходимы для вычисления значений коэффициентов гармоник K_{r2} , K_{r3} , K_{r4} , а также суммарный коэффициент $K_{r. \text{сум.}}$. Коэффициенты гармоник вычисляют по следующим формулам:

$$K_{r2} = \frac{0,75(a - b)}{a + b + \vartheta}; \quad K_{r3} = \frac{a + b - 2\vartheta}{2(a + b + \vartheta)};$$

$$K_{r4} = \frac{3e - 3\delta + \gamma - \mathcal{X}}{4(a + b + \vartheta)}; \quad K_{r. \text{сум.}} = \sqrt{K_{r2}^2 + K_{r3}^2 + K_{r4}^2}.$$

Полученные и расчетные значения для удобства можно занести в табл. 5.2. Из данных таблицы видно, что при выполнении условий по значению коэффициента нелинейных искажений $K_{\text{НИ}} \leq 2\%$ на сопротивлении нагрузки будет выделяться мощность $P_{\text{вых}} = 2,33$ Вт, что соответствует первой нагрузочной прямой.

3. Расчет элементов цепи автоматического смещения:

$$R8 = \frac{|U_{c1}|}{I_{a0} + I_{\vartheta 0}} = \frac{|-6|}{(46 + 5) \cdot 10^{-3}} = 117,6 \text{ Ом};$$

$$C7 = \frac{10^6}{0,2(2\pi f_H R_K)} = \frac{10^6}{0,2(2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 117,6)} = 112,84 \text{ мкФ}.$$

Стандартные значения элементов цепи автоматического смещения $C7 = 120$ мкФ, $R8 = 120$ Ом.

4. Расчет элементов в цепи экранирующей сетки:

$$R6 = \frac{U_a - U_g}{I_g} = \frac{270 - 240}{5 \cdot 10^{-3}} = 6 \text{ кОм};$$

$$C5 = \frac{10^6}{0,2(2\pi f_n R_a)} = \frac{10^6}{0,2(2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 6 \cdot 10^3)} = 2,211 \text{ мкФ}.$$

Стандартные значения элементов в цепи экранирующей сетки $C5 = 2,2 \text{ мкФ}$, $R6 = 6,2 \text{ кОм}$.

5. Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$n = \sqrt{\frac{R_n}{\eta_{тр} R_a}} = \sqrt{\frac{4}{0,8 \cdot 2429}} = 0,0453.$$

6. Индуктивность рассеяния первичной обмотки выходного трансформатора

$$L_{S1} = \frac{R_a + R_i}{2\pi f_n} \sqrt{M_n^2 - 1} = \frac{2,429 + 3 \cdot 10^4}{2 \cdot 3,14 \cdot 12000} \sqrt{1,12^2 - 1} = 0,217 \text{ Гн}.$$

7. Расчет элементов низкочастотной коррекции:

$$R7 = 2R_a = 2 \cdot 2429 = 4,858 \text{ кОм};$$

$$C6 = \frac{L_{S1} + \frac{L_n}{n^2}}{R_{кор}^2} \cdot 10^{12} = \frac{0,217 + \frac{0,002}{0,0453^2}}{4,858^2} \cdot 10^{12} = 7100 \text{ пФ}.$$

Стандартные значения элементов корректирующей цепи $C6 = 6800 \text{ пФ} = 6,8 \text{ нФ}$, $R7 = 5100 \text{ Ом} = 5,1 \text{ кОм}$.

Принципиальная схема УЗЧ с рассчитанными номиналами радиоэлементов представлена на рис. 5.13.

Следует отметить, что при работе лампы 6П14П в типовом режиме при мощности в нагрузке 1,2...2 Вт в качестве выходного трансформатора удобно применить трансформатор типа ТВЗ-1-9, что и было сделано в авторском варианте. Схема источника анодного питания представлена на рис. 5.14.

Силовой трансформатор использован от радиолы «Ригонда-моно», цепи накала входной и выходных ламп питаются от различных обмоток силового трансформатора. Источником питания анодных цепей служит простой параметрический стабилизатор на транзисторе VT1 типа КТ812А. В качестве источника опорного напряжения может использоваться линейка стабилитронов VD5–VDN серий Д816, Д817, КС620, КС650, КС920 и др. (табл. 7 Приложения), число которых подбирают до получения требуемого напряжения на выходе стабилизатора.

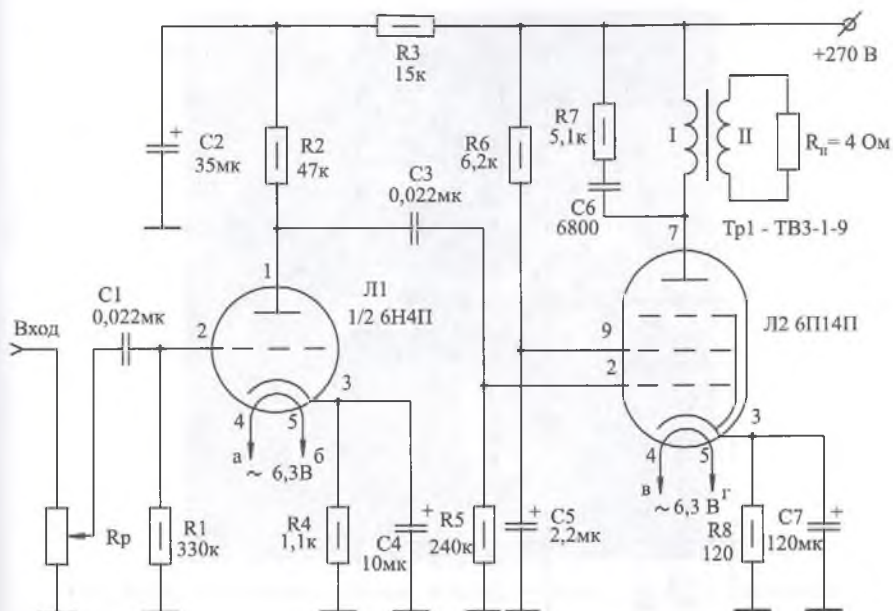


Рис. 5.13. Принципиальная схема стереофонического УЗЧ (показан один канал)

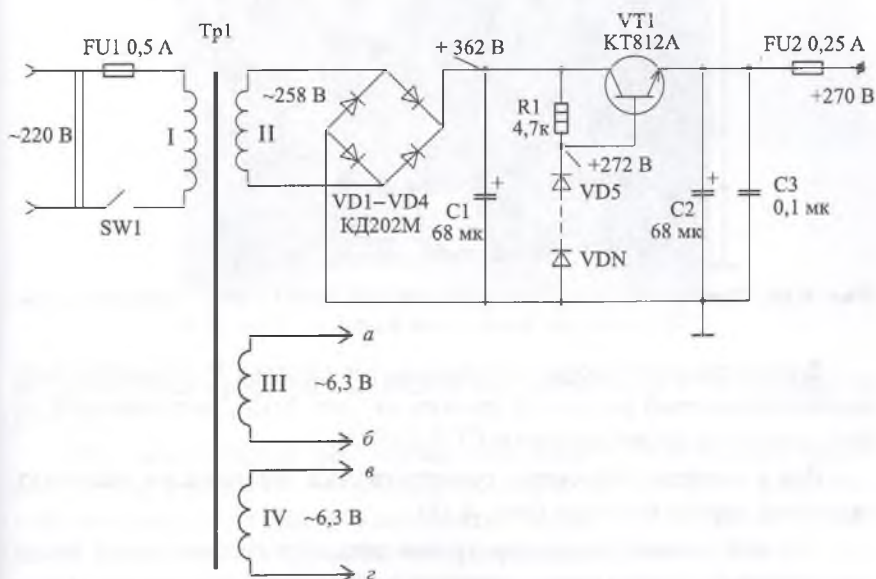


Рис. 5.14. Источник питания стереофонического УЗЧ

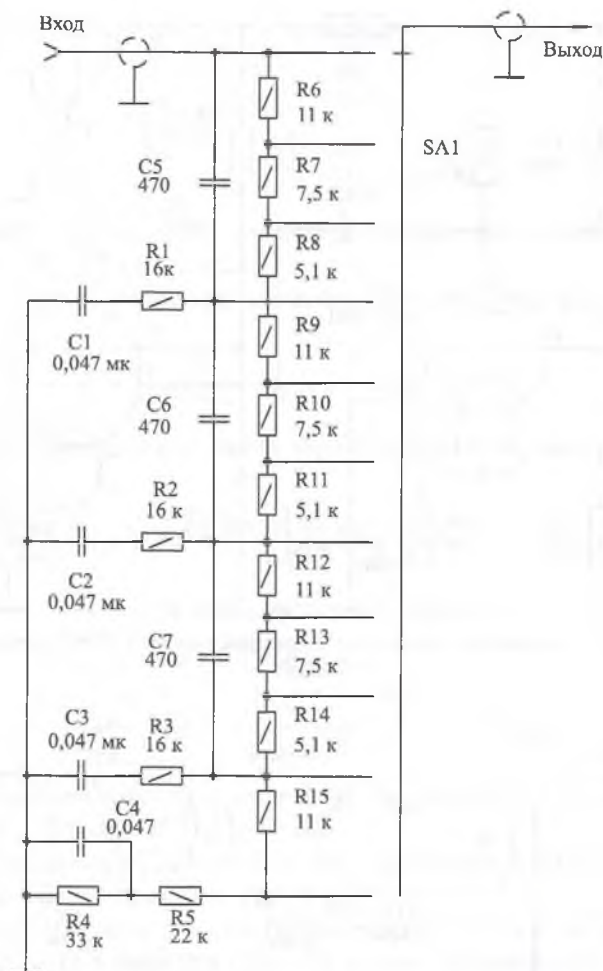


Рис. 5.15. Принципиальная схема тонкомпенсированного регулятора громкости

В качестве регулятора уровня входного сигнала R_p применен тонкомпенсированный регулятор громкости (рис. 5.15), выполненный на базе галетного переключателя ПГК-11П1Н.

Все элементы регулятора громкости смонтированы на лепестках галетного переключателя (рис. 5.16).

Так как данный регулятор уровня входного сигнала имеет высокое выходное сопротивление, которое практически не зависит от выходного сигнала, то для минимизации внешних наводок он целиком помещен в металлический экран, а сигнальные цепи выполнены эк-

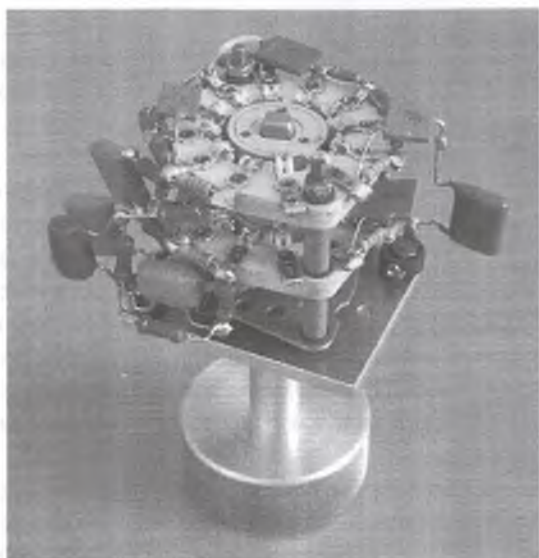


Рис. 5.16. Вид собранного тонкомпенсированного регулятора громкости



Рис. 5.17. Внешний вид стереофонического УЗЧ

ранированным проводом. Внешний вид собранного УЗЧ показан на рис. 5.17.

При практической реализации ламповых УЗЧ возможно несколько путей монтажа электронных компонентов. Наряду с разработкой печатных плат часто используется классический способ применения навесного монтажа, при котором радиоэлементы распаиваются на лепестках ламповых панелей и монтажных стойках. Внешний вид монтажных лепестков и стоек, выпускавшихся промышленностью для использования в ламповой аппаратуре, показан на рис. 5.18.

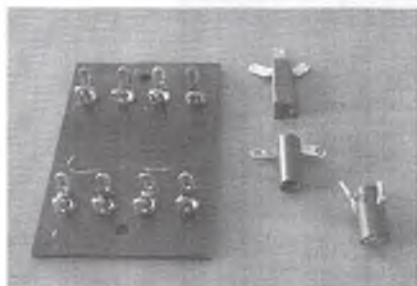


Рис. 5.18. Вид монтажных лепестков и стоек промышленного изготовления

Однако использование при конструировании высококачественных УЗЧ монтажных стоек, уже использовавшихся в аппаратуре, нецелесообразно по двум основным причинам: старение материала стоек и как следствие уменьшение сопротивления изоляции, ослабление механической прочности крепления токопроводящих лепестков. С учетом этого автором

в результате практических экспериментов с ламповыми устройствами разработаны два типа монтажных стоек — монтажная линейка и монтажный лепесток.

Для изготовления монтажной линейки (чертеж представлен на рис. 5.19) подходит листовой стеклотекстолит толщиной 3...5 мм марок СТЭД или СТЭФ с удельным поверхностным сопротивлением 10^{12} Ом. После разметки в заготовке сверлят два ряда глухих отверстий сверлом диаметром 1,3 мм.

Медная проволока диаметром 1,0 мм облуживается и нарезается отрезками по 12 мм. Затем отрезки вклеиваются с помощью эпоксидного компаунда в стеклотекстолит. Внешний вид готовой монтажной линейки показан на рис. 5.20.

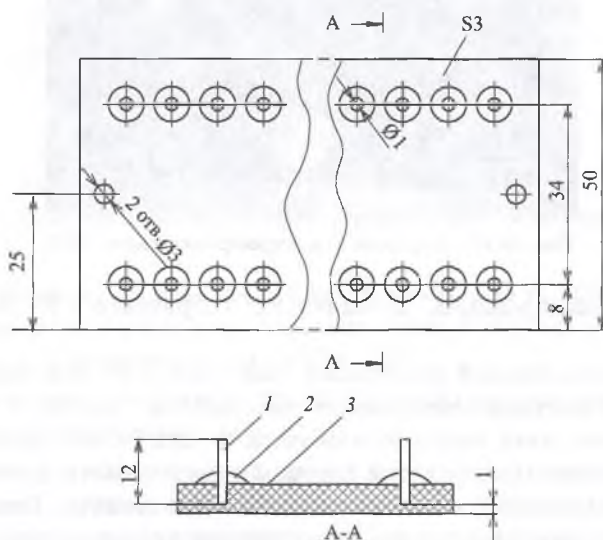


Рис. 5.19. Чертеж монтажной линейки



Рис. 5.20. Внешний вид монтажной линейки после высыхания эпоксидного компаунда

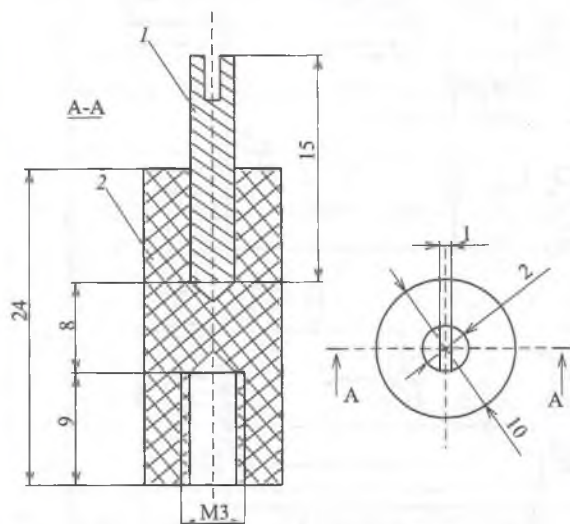


Рис. 5.21. Чертеж монтажного лепестка



Рис. 5.22. Внешний вид монтажного лепестка

Для изготовления монтажных лепестков (чертеж представлен на рис. 5.21) подходят позолоченные или посеребренные цилиндрические контакты от штепсельных разъемов 1, которые впрессовываются в стеклотекстолитовые или фторопластовые втулки 2. В качестве материала для изготовления втулок более предпочтителен фторопласт, так как этот материал обладает наибольшим показателем удельного объемного сопротивления, равным $1,5 \cdot 10^{17}$ Ом·см.

Внешний вид изготовленного монтажного лепестка с использованием в качестве втулки фторопласта показан на рис. 5.22.

Одним из направлений конструирования ламповых УЗЧ является сборка УЗЧ с использованием радиоэлементов от выпускавшихся ранее радиоприемников и радиол, например таких, как «Урал-112»,

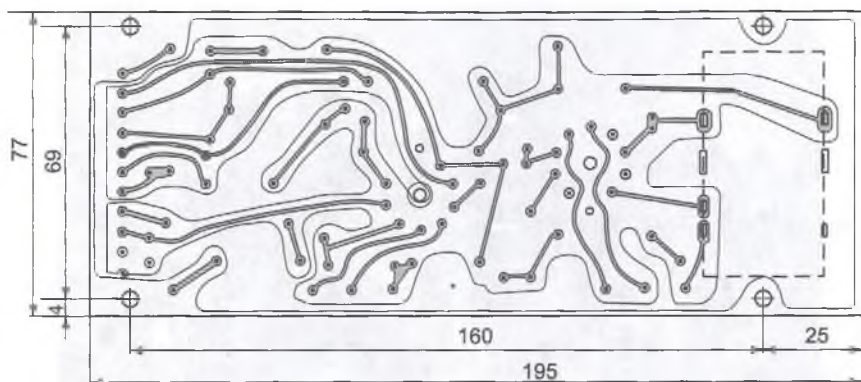


Рис. 5.24. Расположение печатных проводников на плате УЗЧ радиолы «Ригонда-моно»

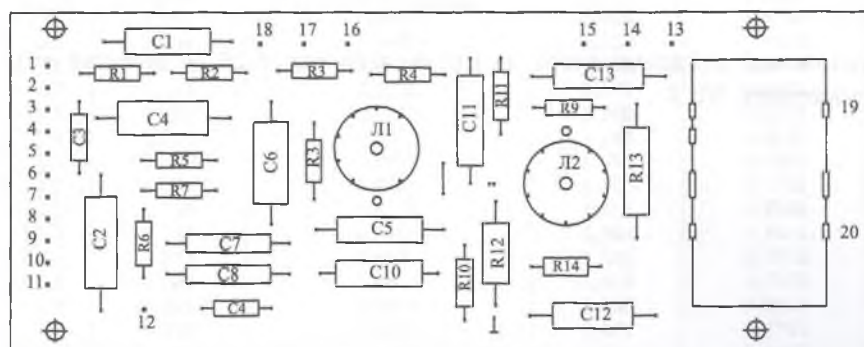


Рис. 5.25. Вид платы УЗЧ радиолы «Ригонда-моно» со стороны расположения радиоэлементов

«Ригонда-моно», «Ригонда-102». Схемотехника УЗЧ указанных аппаратов при своей простоте обеспечивает достаточно высокое качество звуковоспроизведения. Для примера на рис. 5.23 приведена принципиальная схема двухкаскадного УЗЧ радиолы «Ригонда-моно».

Однако существенным недостатком УЗЧ этих аппаратов является то, что они выполнены на печатных платах из фольгированного гетинакса. С течением времени происходит ухудшение изоляционных свойств гетинакса, а также механическая деформация и коробление печатных плат, выполненных из этого материала. Поэтому для реализации УЗЧ необходимо заново изготовить печатную плату из качественного материала, например фольгированного стеклотекстолита марки FR-4.

Для примера на рис. 5.24 приведено расположение печатных проводников на плате УЗЧ радиолы «Ригонда-моно», на рис. 5.25 — рас-

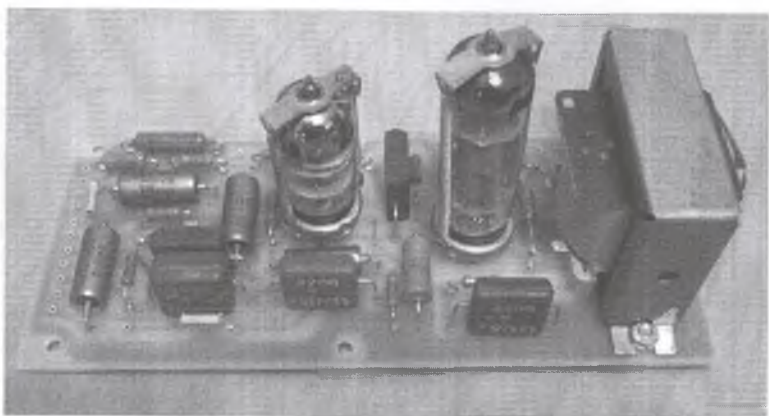


Рис. 5.26. Внешний вид изготовленной заново платы УЗЧ радиолы «Ригонда-моно»

положение радиоэлементов на плате, а на рис. 5.26 — внешний вид собранного УЗЧ.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Пересчет децибел в отношения напряжений (токов) и мощностей

дБ	Отношение токов и напряжений		Отношение мощностей	
	Усиление	Ослабление	Усиление	Ослабление
0,0	1,000	1,0000	1,000	1,000
0,1	1,012	0,9886	1,023	0,9772
0,2	1,023	0,9772	1,047	0,9550
0,3	1,035	0,9661	1,072	0,9333
0,4	1,047	0,9550	1,096	0,9120
0,5	1,059	0,9441	1,122	0,8913
0,6	1,072	0,9333	1,148	0,8710
0,7	1,084	0,9226	1,175	0,8511
0,8	1,096	0,9120	1,202	0,8318
0,9	1,109	0,9016	1,230	0,8128
1,0	1,122	0,8913	1,259	0,7943
1,1	1,135	0,8810	1,288	0,7762
1,2	1,148	0,8710	1,318	0,7586
1,3	1,161	0,8610	1,349	0,7413
1,4	1,175	0,8511	1,380	0,7244
1,5	1,189	0,8414	1,413	0,7079
1,6	1,202	0,8318	1,445	0,6918
1,7	1,216	0,8222	1,479	0,6761
1,8	1,230	0,8128	1,514	0,6607
1,9	1,245	0,8035	1,549	0,6457
2,0	1,259	0,7943	1,585	0,6310
2,1	1,274	0,7852	1,622	0,6166
2,2	1,288	0,7762	1,660	0,6026
2,3	1,303	0,7674	1,698	0,5888
2,4	1,318	0,7586	1,738	0,5754
2,5	1,334	0,7449	1,778	0,5623
2,6	1,349	0,7413	1,820	0,5495
2,7	1,365	0,7328	1,862	0,5370
2,8	1,380	0,7244	1,905	0,5248
2,9	1,396	0,7161	1,950	0,5129
3,0	1,413	0,7079	1,995	0,5012
3,1	1,429	0,6998	2,042	0,4898
3,2	1,445	0,6918	2,089	0,4786
3,3	1,462	0,6839	2,138	0,4677
3,4	1,479	0,6761	2,188	0,4571
3,5	1,496	0,6683	2,239	0,4467
3,6	1,514	0,6607	2,291	0,4365
3,7	1,531	0,6531	2,344	0,4266
3,8	1,549	0,6457	2,399	0,4169
3,9	1,567	0,6383	2,455	0,4074
4,0	1,585	0,6310	2,512	0,3981

Окончание табл.

дБ	Отношение токов и напряжений		Отношение мощностей	
	Усиление	Ослабление	Усиление	Ослабление
4,2	1,622	0,6166	2,630	0,3802
4,4	1,660	0,6026	2,754	0,3631
4,6	1,698	0,5888	2,884	0,3467
4,8	1,738	0,5754	3,020	0,3311
5,0	1,778	0,5623	3,162	0,3162
5,5	1,884	0,5309	3,548	0,2818
6,0	1,995	0,5012	3,981	0,2512
6,5	2,113	0,4732	4,467	0,2239
7,0	2,239	0,4467	5,012	0,1995
7,5	2,371	0,4217	5,623	0,1778
8,0	2,512	0,3981	6,312	0,1585
8,5	2,661	0,3758	7,079	0,1431
9,0	2,818	0,3548	7,943	0,1259
9,5	2,985	0,3350	8,913	0,1122
10,0	3,162	0,3162	10,00	0,1000
10,5	3,350	0,2985	11,22	0,08913
11,0	3,548	0,2818	12,59	0,07943
11,5	3,758	0,2661	14,13	0,07079
12,0	3,981	0,2512	15,85	0,06310
12,5	4,217	0,2371	17,78	0,05623
13,0	4,467	0,2239	19,95	0,05012
13,5	4,732	0,2113	22,39	0,04467
14,0	5,012	0,1995	25,12	0,03981
14,5	5,309	0,1884	28,18	0,03548
15,0	5,623	0,1778	31,62	0,03162
15,5	5,957	0,1679	35,48	0,02818
16,0	6,310	0,1585	39,81	0,02512
16,5	6,683	0,1496	44,67	0,02239
17,0	7,079	0,1413	50,12	0,01995
17,5	7,499	0,1334	56,23	0,01778
18,0	7,943	0,1259	63,10	0,01585
18,5	8,414	0,1189	70,79	0,01413
19,0	8,913	0,1122	79,43	0,01295
19,5	9,441	0,1059	89,12	0,01122
20,0	10,000	0,1000	100,00	0,01000
25,0	17,780	0,0562	316,20	0,003162
30,0	31,620	0,0316	1000,0	0,001
35,0	56,230	0,0178	3162,0	0,0003162
40,0	100,000	0,0100	10000,0	0,0001
45,0	177,800	0,0056	31620,0	0,00003162
50,0	316,200	0,0032	100000,0	0,00001
55,0	562,300	0,0018	316200,0	0,000003162
60,0	1000,000	0,0010	1000000,0	0,000001

Таблица 2

Основные параметры кенотронов и диодов

Лампа	Число анодов	U_n , В	I_n , А	I_0 max, мА	$U_{обр\ max}$, В	$I_{им\ max}$, мА	R_I (на один анод), Ом
6Д20П	1	6,3	1,8	220,0	6500,0	600,0	
4Ц6С	1	4,0	1,8	не менее 7,0	50,0	10,0	
5Ц3С	2	5,0	3,0	115×2	1700,0	750×2	200,0
5Ц4С	2	5,0	2,0	62×2	1350,0	375×2	150,0
5Ц8С	2	5,0	5,0	210×2	1700,0	1200×2	200,0
5Ц9С	2	5,0	3,0	105×2	1700,0	600×2	300,0
5Ц12П	1	5,0	0,87	50,0	5000,0	350,0	400,0
6Ц4С	2	6,3	0,6	75×2	1000,0	350×2	250,0
6Ц5С	2	6,3	0,6	75×2	1100,0	300×2	250,0
6Ц13П	1	6,3		120,0	1600,0	900,0	130,0

Таблица 3

Статические параметры триодов применяемых в УЗЧ

Электронная лампа	Тип	Крутизна (S), мА/В	Коэффициент усиления, μ	Внутреннее сопротивление (R_i), кОм
6Н1П	Двойной триод	4,45	35,0	7,90
6Н2П	Двойной триод	2,10	97,5	46,30
6Н3П	Двойной триод	4,90	36,0	6,10
6Н4П	Двойной триод	1,75	41,0	23,50
6Н5П	Двойной триод	4,20	27,0	6,50
6Н5С	Двойной триод	4,45	2,0	0,45
6Н6П	Двойной триод	11,00	4,0	0,36
6Н7С	Двойной триод	3,20	35,0	11,00
6Н8С	Двойной триод	2,60	20,5	7,90
6Н9С	Двойной триод	1,60	70,0	43,75
6Н15П	Двойной триод	5,60	38,0	6,80
6Н23П	Двойной триод	12,70	34,0	2,56
6С2С	Триод	1,65	20,5	12,43
6С3В	Триод	2,20	14,0	6,40
6С4С	Триод	5,40	4,2	0,78
6Ф3П	Триодная часть	2,50	75,0	30,00
6Ф4П	Триодная часть	4,00	65,0	16,25
6Ф5П	Триодная часть	7,00	70,0	10,00

Таблица 4

Геометрические размеры Ш-образных пластин трансформаторов

Тип пластины	A, см	B, см	H, см	Q ₀ , см	L, см
Ш-11	1,1	1,15	3,40	3,90	10,00
Ш-12	1,2	1,20	2,60	3,12	9,50
Ш-15	1,5	1,35	2,40	3,24	10,00
Ш-16	1,6	1,60	2,40	3,84	10,50
Ш-16	1,6	1,60	3,80	6,08	13,35
Ш-19	1,9	1,70	4,60	7,80	15,00
Ш-20	2,0	1,00	3,00	3,00	12,00
Ш-20	2,0	2,00	3,00	6,00	13,14
Ш-20	2,0	2,00	5,00	10,00	17,14
Ш-25	2,5	2,50	6,00	15,00	20,00
Ш-25	2,5	2,50	6,25	15,60	21,40
Ш-30	3,0	1,50	4,50	6,75	18,00
Ш-32	3,2	3,20	8,00	25,60	27,40
Ш-40	4,0	3,00	7,00	21,00	28,00
Ш-40	4,0	4,00	10,00	40,00	34,30

Таблица 5

Формулы для расчета выпрямителей

Параметр	Схема выпрямителя			
	Однополу- периодная	Двухполу- периодная	Мостовая	Удвоения
Число плеч в схеме	1	2	4	2
Выпрямленный ток плеча I_0	I_0	$I_0/2$	$I_0/2$	I_0
Обратное напряжение плеча, $U_{обр}$	$3U_0$	$3U_0$	$1,5U_0$	$1,5U_0$
Максимальный импульс тока в плече, I_{max}	$7I_0$	$3,5I_0$	$3,5I_0$	$7I_0$
Значение коэффициента k	0,09	0,18	0,15	0,04
Сопrotивление фазы выпрямителя R_{ϕ}	$R_i + r_{mp}$	$R_i + r_{mp}$	$2R_i + r_{mp}$	$R_i + r_{mp}$
Значение коэффициента m	1	2	2	1
Ток вторичной (повышающей) обмотки трансформатора	$I_0 D$	$I_0 D/2$	$I_0 D/1,4$	$1,4I_0 D$
Ток первичной (сетевой) обмотки трансформатора	$1,2n\sqrt{I_2^2 - I_0^2}$	$1,7nI_2$	$1,2nI_2$	$1,2nI_2$

Таблица 6

Зависимость габаритной мощности силового трансформатора от схемы выпрямления

Схема выпрямителя	Габаритная мощность трансформатора $P_{габ}$, ВА
Однополупериодная	$0,95U_2 I_2$
Двухполупериодная	$1,7U_2 I_2$
Мостовая	$U_2 I_2$
Удвоения	$U_2 I_2$

Таблица 7

Параметры стабилитронов

Тип стабилитрона	Напряжение стабилизации, В			Ток стабилизации, мА	
	$U_{ном}$	U_{min}	U_{max}	I_{min}	I_{max}
Δ815А	5,6	5,0	6,2	3,0	55,0
Δ815В	6,8	6,1	7,5	3,0	55,0
Δ815В	8,2	7,4	9,1	50,0	950,0
Δ815Г	10,0	9,0	11,0	25,0	800,0
Δ815Д	12,0	10,8	13,3	25,0	650,0
Δ815Е	15,0	13,3	16,4	25,0	550,0
Δ815Ж	18,0	16,2	19,8	45,0	125,0
Δ816А	22,0	19,6	24,2	10,0	230,0
Δ816В	27,0	24,2	29,5	10,0	180,0
Δ816В	33,0	29,5	36,0	10,0	150,0
Δ816Г	47,0	42,5	51,5	10,0	110,0
Δ817А	56,0	50,5	61,5	5,0	90,0
Δ817В	68,0	61,0	75,0	5,0	75,0
Δ817В	82,0	74,0	90,0	5,0	60,0
Δ817Г	100,0	90,0	110,0	5,0	50,0
КС600А	100,0	95,0	105,0	5,0	8,1
КС620А (КС920А)	120,0	108,0	132,0	5,0	42,0
КС630А (КС930А)	130,0	117,0	143,0	5,0	38,0
КС650А (КС950А)	150,0	136,0	164,0	2,5	33,0
КС680А (КС980А)	180,0	162,0	198,0	2,5	28,0

ЛИТЕРАТУРА

1. Уилсон М. Американские ученые и изобретатели. Пер. с англ. 2-е изд. — М., 1975. — 136 с.
2. Шехмейстер Е.И. Технология производства электровакуумных приборов. — М.: Высшая школа, 1992. — 543 с.
3. Петров К.С., Язгур О.Я. Электровакуумные приборы. — М.: Связь, 1970. — 320 с.
4. Калашников А.М., Слуцкий В.З. Основы радиотехники и радиолокации. Электровакуумные приборы и импульсная техника. — М.: Воениздат, 1965. — 428 с.
5. Электровакуумные приборы. Справочник / Под ред. А.М. Броде. — М.: Государственное энергетическое издательство, 1956. — 422 с.
6. Голубев Ю.Л., Жукова Т.В. Электровакуумные приборы. Справочник (100 приемно-усилительных ламп). — М.: Энергия, 1969. — 296 с. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 708).
7. Войшвилло Г.В. Усилители низкой частоты на электронных лампах. — М.: Государственное издательство по вопросам связи и радио, 1959. — 751 с.
8. Вольшов В. Схемы предварительных усилителей низкой частоты // Радио. 1963. т 5. С. 45–49.
9. Культин Н.В. Основы программирования в Delphi 7. — СПб.: ВХВ — Петербург, 2003. — 608 с.
10. Антонов В. Электронный стабилизатор с кремниевым стабилитроном // Радио. 1963. т 9. С. 62.
11. Николаев А.П., Малкина М.В. 500 схем для радиолюбителей. — Уфа: SASHKIN SOFT, 1999. — 220 с.
12. Зельдин Е.А. Децибелы. 2-е изд., доп. — М.: Энергия, 1977. — 64 с. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 949).
13. Пиз А.Р. Практическая электроника аналоговых устройств. Поиск неисправностей и отработка проектируемых схем: Пер. с англ. — М.: ДМК Пресс, 2001. — 320 с. (Серия «Учебник»).
14. Зуев П. Регулятор громкости с распределенной частотной коррекцией // Радио. 1986. т 8. С. 49–51.
15. Радиола «Ригонда-моно». Описание и инструкция по использованию. — Рижский радиозавод им. А.С. Попова, 1967.
16. Григорьев О.П., Замятин В.Я., Кондратьев В.В., Пожидаев С.А. Диоды: Справочник. — М.: Радио и связь, 1990. — 336 с. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 1158).
17. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник. — М.: Издательство стандартов, 1989. — 325 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 Конструктивное исполнение радиоламп	5
2 Электровакуумный диод	11
2.1. Устройство и принцип работы диода	11
2.2. Характеристики диода	13
2.3. Статические параметры диода	15
2.4. Применение диодов	15
3 Электровакуумный триод	17
3.1. Устройство и принцип действия триода	17
3.2. Анодные характеристики триода	19
3.3. Сеточные характеристики триода	21
3.4. Графический метод определения параметров триода ..	21
3.5. Практические расчеты каскадов на триодах	24
3.5.1. Предварительный каскад	24
3.5.2. Оконечный одноктактный каскад	31
3.5.3. Оконечный двухтактный каскад	38
3.6. Фазоинверсные каскады	45
4 Экранированные лампы	54
4.1. Устройство и принцип действия тетрода	54
4.2. Закон трех вторых для тетрода	55
4.3. Статические характеристики тетрода	55
4.4. Устройство и принцип действия пентода	59
4.5. Статические характеристики пентода	61
4.6. Параметры пентодов	63
4.7. Практические расчеты каскадов на экранированных лампах	66
4.7.1. Предварительный каскад	66
4.7.2. Выходной одноктактный каскад	73
4.7.3. Выходной двухтактный каскад	81
5 Источники питания ламповых УЗЧ	88
5.1. Работа электронного стабилизатора	88
5.2. Расчет электронного стабилизатора	89

5.3. Расчет выпрямителя питающего электронный стабилизатора	94
5.4. Конструктивный расчет дросселя сглаживающего фильтра	97
5.5. Конструктивный расчет силового трансформатора	100
5.6. Практическая реализация ламповых УЗЧ	102
Приложение	117
Литература	122